



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

MAESTRÍA EN CIENCIA DE LOS ALIMENTOS

TESIS

CARACTERIZACIÓN DE CERVEZA ARTESANAL AROMATIZADA CON JENGIBRE (*Zingiber officinale*)

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencia de los Alimentos

PRESENTA

I.A. Ernesto Guzmán Zárate

Director
Dr. Sergio Soto Simental

Comité tutorial
Dra. Aurora Quintero Lira
Dr. Javier Piloni Martini
Dr. César Uriel López Palestina

Tulancingo de Bravo, Hgo., México 2026.



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Institute of Agricultural Sciences

Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos

Academic Area of Agroindustrial Engineering and Food Engineering

Asunto: Autorización de impresión de tesis

El Comité Tutorial de la Tesis titulada **Caracterización de cerveza artesanal aromatizada con jengibre (*Zingiber officinale*)**, realizada por el sustentante **Ernesto Guzmán Zárate** con número de cuenta **124019** perteneciente al programa de **Maestría en Ciencia de los Alimentos**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional, y de acuerdo con lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos establecidos en el Reglamento de Estudios de Posgrado para la defensa oral en el examen de grado correspondiente.

Atentamente

"Amor, Orden y Progreso"

Tulancingo de Bravo, Hidalgo, a 5 de febrero de 2026

El Comité Tutorial

Dr. Sergio Soto Simental
Director

Dr. Javier Piloni Martini
Miembro del comité



Dra. Aurora Quintero Lira
Miembro del comité

Dr. César Uriel López Palestina
Miembro del comité

"Amor, Orden y Progreso"



2025



Avenida Universidad #133, Col. San Miguel Huatengo,
Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo,
México. C.P. 43775
Teléfono 7717172000 Ext.42021
maestria_alimentos@uaeh.edu.mx
uaeh.edu.mx

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía y sustento durante este camino, y por concederme la salud y perseverancia necesarias para alcanzar esta meta.

A mi abuela Aurora, mi madre Ana María y mi hermano Arturo, que desde el cielo celebran conmigo este logro. Su amor, enseñanzas y recuerdos fueron la fuerza que me impulsó a no rendirme nunca.

A mi esposa María, por ser mi compañera incondicional, por secar mis lágrimas en los momentos difíciles y por creer en mí cuando yo mismo dudaba. Este triunfo también es tuyo.

A mis hijas Renata y Natalia, por ser mi mayor inspiración y por enseñarme que los sueños se persiguen no solo por uno mismo, sino por quienes amamos. Espero que este ejemplo las motive a alcanzar sus propias metas.

A mi hermano Alberto, por estar siempre presente, por su apoyo constante y por recordarme que la familia es nuestro mayor tesoro.

A Eric, mi amigo, que con valentía sigue en la lucha y me enseña el verdadero significado de la esperanza.

A mis fieles compañeros peluditos, por acompañarme en cada desvelo y llenar de ternura mis días más difíciles.

Agradecimientos

Al Doctor Sergio Soto Simental, director de esta tesis, por su guía académica, paciencia y dedicación durante todo el proceso de investigación. Su experiencia y conocimientos fueron fundamentales para el desarrollo exitoso de este trabajo.

Al cuerpo académico Alimentos de Origen Vegetal perteneciente al Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos, del Programa de Maestría en Ciencia de los Alimentos, por su compromiso con la excelencia académica y por brindarme las herramientas teóricas y metodológicas necesarias para realizar esta investigación.

A los profesores Dra. Aurora Quintero Lira y Dr. Javier Piloni Martini, por sus valiosas aportaciones, sugerencias y el tiempo dedicado a enriquecer mi formación académica y profesional.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), al Instituto de Ciencias Agropecuarias, por proporcionar el espacio académico y los recursos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

A la Universidad Politécnica de Pénjamo Guanajuato (UPP), en particular a la Dra. Victoria Aguilar Aquino y Dr. Jahir Antonio Barajas por la confianza, enseñanzas, hospitalidad y el valioso tiempo de calidad que me brindaron al estar lejos de casa.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el otorgamiento de la beca de posgrado CVU: 1309460, apoyo que hizo posible la realización de mis estudios de maestría

A los responsables de los diversos laboratorios por las facilidades otorgadas para la realización del trabajo experimental y por su apoyo especializado.

A mis compañeros de maestría, por los momentos de aprendizaje compartido, las discusiones académicas enriquecedoras y el apoyo mutuo durante este proceso formativo.

Finalmente, agradezco a todas las personas e instituciones que de manera directa o indirecta contribuyeron a la realización de este trabajo de investigación.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	MARCO TEÓRICO	3
2.1	Cerveza	3
2.1.1	Definición	3
2.1.2	Contexto histórico y diversidad botánica.....	3
2.1.3	Producción artesanal.....	4
2.1.4	Definición legal mexicana	4
2.1.5	Contexto productivo de materias primas en México	4
2.1.6	Ventajas metodológicas de extractos comerciales.....	5
2.2	Levadura Kveik	6
2.2.1	Características genéticas distintivas	6
2.2.2	Propiedades fermentativas	6
2.2.3	Ventajas para incorporación de ingredientes botánicos	6
2.3	Jengibre como ingrediente funcional.....	8
2.3.1	Definición y características	8
2.3.2	Composición y compuestos bioactivos del jengibre	8
2.3.3	Compuestos aromáticos volátiles	8
2.3.4	Fenilalcanoides bioactivos	9
2.3.5	Relevancia de compuestos en matriz cervecera	9
2.3.6	Aplicaciones del jengibre en bebidas fermentadas.....	9
2.4	Aromatización con lúpulo	10
2.4.1	Aromatización con ingredientes botánicos no tradicionales.....	11

2.4.2	Factores determinantes de extracción en frío.....	11
2.5	Ácidos fenólicos en cerveza: fundamentos bioquímicos.....	11
2.5.1	Metabolismo de compuestos fenólicos durante fermentación alcohólica	12
3	JUSTIFICACIÓN.....	13
4	OBJETIVOS	14
4.1	Objetivo General	14
4.2	Objetivos Específicos	14
5	HIPÓTESIS.....	15
6	MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
6.1	Materias primas	16
6.1.1	Extracto de malta.....	16
6.1.2	Extracto de jengibre.....	16
6.1.3	Levadura	17
6.1.4	Agua.....	17
6.1.5	Reactivos y soluciones.....	17
6.2	Diseño experimental.....	19
6.3	Descripción del proceso cervecero.....	21
6.3.1	Proceso de elaboración del mosto	21
6.3.2	Enfriamiento y ajuste de volumen.....	22
6.3.3	Verificación de parámetros del mosto.....	22
6.3.4	Fermentación.....	23
6.3.5	Aplicación de tratamientos con jengibre	23
6.3.6	Proceso de acabado.....	24

6.3.7	Control de calidad del proceso	25
6.4	Análisis químico proximal de la materia prima	25
6.4.1	Determinación de humedad	25
6.4.2	Determinación de cenizas	26
6.4.3	Determinación de extracto etéreo.....	26
6.4.4	Determinación de fibra cruda.....	27
6.4.5	Determinación de proteína	27
6.4.6	Determinación de carbohidratos.....	28
6.5	Metodología de análisis fisicoquímico	29
6.5.1	Preparación general de muestras	29
6.5.2	Determinación de pH.....	29
6.5.3	Determinación de contenido alcohólico	30
6.5.4	Determinación de acidez titulable	31
6.5.5	Determinación de color EBC	31
6.6	Metodología parámetros funcionales.....	33
6.6.1	Determinación de compuestos fenólicos totales	33
6.6.2	Determinación de flavonoides totales.....	33
6.6.3	Ensayo de inhibición del radical DPPH.....	34
6.6.4	Identificación de ácidos fenólicos por HPLC	35
6.7	Metodología de análisis microbiológico.....	38
6.7.1	Toma y preparación de muestras	38
6.7.2	Medios de cultivo y preparación	38
6.7.3	Procedimientos de análisis por grupo microbiano	39

6.7.4	Condiciones de incubación e identificación.....	39
6.7.5	Limites microbiológicos de referencia e interpretación	40
6.8	Metodología del análisis sensorial	41
6.8.1	Selección y caracterización de panelistas	41
6.8.2	Preparación y presentación de muestras	42
6.8.3	Método CATA (Check-All-That-Apply).....	42
6.8.4	Evaluación hedónica.....	43
6.8.5	Condiciones ambientales y de evaluación	43
6.9	Análisis estadístico	44
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
7.1	Composición químico proximal.....	45
7.1.1	Composición del extracto de jengibre	45
7.1.2	Interpretación funcional para aplicación a cerveza	46
7.1.3	Composición del extracto de malta	48
7.1.4	Interpretación funcional de la complementariedad composicional.....	49
7.2	Características fisicoquímicas	52
7.2.1	pH y acidez titulable: efectos sobre estabilidad y perfil sensorial	54
7.2.2	Color EBC: comportamiento no proporcional y relevancia estética	55
7.3	Actividad antioxidante.....	57
7.3.1	Interpretación del impacto del jengibre en la actividad antioxidante.....	58
7.4	Identificación de compuestos fenólicos por HPLC	60
7.4.1	Análisis del perfil fenólico modificado y mecanismos de transformación.....	60
7.5	Estabilidad microbiológica	63

7.5.1	Análisis estadístico de diferencias entre tratamientos	63
7.5.2	Estabilidad microbiológica y efecto antimicrobiano	64
7.6.1	Análisis de correspondencia.....	67
7.6.2	Análisis CATA y caracterización sensorial por descriptores	68
7.6.3	Correlación entre perfil sensorial CATA y aceptabilidad hedónica.....	72
7.6.4	Discusión comparativa y relevancia del perfil sensorial	74
8	CONCLUSIONES.....	75
9	REFERENCIAS	77
10	ANEXOS	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones de gradiente cromatográfico para análisis de ácidos fenólicos mediante HPLC.....	36
Tabla 2. Análisis químico proximal del extracto de jengibre (<i>Zingiber officinale</i>)	45
Tabla 3. Análisis químico proximal del extracto de malta	48
Tabla 4. Parámetros de fermentación de cerveza artesanal con diferentes concentraciones de extracto de jengibre	52
Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos de las formulaciones con diferentes concentraciones de extracto de jengibre	53
Tabla 6. Compuestos fenólicos totales, flavonoides y actividad antioxidante en cuatro tratamientos diferentes de cerveza artesanal aromatizada con jengibre.....	57
Tabla 7. Concentración de ácidos fenólicos específicos en cerveza artesanal aromatizada con jengibre determinada por HPLC	60
Tabla 8. Carga microbiana ($\log_{10}$ UFC/mL) de cerveza artesanal elaborada con diferentes concentraciones de extracto de jengibre.....	63
Tabla 9. Características demográficas de panelistas para evaluación sensorial.....	67
Tabla 10. Descriptores sensoriales significativos por metodología CATA (porcentaje de selección).....	69
Tabla 11. Evaluación hedónica por grupo de consumidores.....	73
Tabla 12. Frecuencia de selección de descriptores de apariencia – Consumidores ocasionales ..	97
Tabla 13. Frecuencia de selección de descriptores de olor – Consumidores ocasionales	98
Tabla 14. Frecuencia de selección de descriptores de sabor – Consumidores ocasionales	98

Tabla 15. Frecuencia de selección de descriptores de textura – Consumidores ocasionales.....	99
Tabla 16. Frecuencia de selección de descriptores de retrogusto - Consumidores ocasionales ...	99
Tabla 17. Frecuencia de selección de descriptores de apariencia – Consumidores habituales...	100
Tabla 18. Frecuencia de selección de descriptores de olor – Consumidores habituales	100
Tabla 19. Frecuencia de selección de descriptores de sabor – Consumidores habituales	101
Tabla 20. Frecuencia de selección de descriptores de textura – Consumidores habituales.....	101
Tabla 21. Frecuencia de selección de descriptores de retrogusto – Consumidores habituales...	102
Tabla 22. Resultados de Q de Cochran para apariencia – Consumidores ocasionales.....	103
Tabla 23. Resultados de Q de Cochran para olor – Consumidores ocasionales	104
Tabla 24. Resultados de Q de Cochran para sabor – Consumidores ocasionales	104
Tabla 25. Resultados de Q de Cochran para textura – Consumidores ocasionales.....	105
Tabla 26. Resultados de Q de Cochran para retrogusto – Consumidores ocasionales.....	105
Tabla 27. Resultados de Q de Cochran para apariencia – Consumidores habituales.....	106
Tabla 28. Resultados de Q de Cochran para olor – Consumidores habituales	106
Tabla 29. Resultados de Q de Cochran para sabor – Consumidores habituales	107
Tabla 30. Resultados de Q de Cochran para textura – Consumidores habituales.....	107
Tabla 31. Resultados de Q de Cochran para retrogusto – Consumidores habituales	108
Tabla 32. Subconjuntos homogéneos para descriptores de apariencia según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores ocasionales.....	109
Tabla 33. Subconjuntos homogéneos para descriptores de olor según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores ocasionales	110
Tabla 34. Subconjuntos homogéneos para descriptores de sabor según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores ocasionales	110

Tabla 35. Subconjuntos homogéneos para descriptores de textura según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores ocasionales	111
Tabla 36. Subconjuntos homogéneos para descriptores de retrogusto según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores ocasionales.....	111
Tabla 37. Subconjuntos homogéneos para descriptores de apariencia según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores habituales	112
Tabla 38. Subconjuntos homogéneos para descriptores de olor según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores habituales	112
Tabla 39. Subconjuntos homogéneos para descriptores de sabor según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores habituales	113
Tabla 40. Subconjuntos homogéneos para descriptores de textura según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores habituales	113
Tabla 41. Subconjuntos homogéneos para descriptores de retrogusto según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores habituales.....	114
Tabla 42. Resultados de la evaluación hedónica para los diferentes tratamientos de cerveza con jengibre – Consumidores ocasionales.....	115
Tabla 43. Resultados de la evaluación hedónica para los diferentes tratamientos de cerveza con jengibre – Consumidores habituales.....	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de correspondencia – Consumidores ocasionales, [Representación bivariada del Análisis de Correspondencia mostrando tratamientos y descriptores sensoriales; Dimensión 1: 58.5%, Dimensión 2: 32.7%].	70
Figura 2. Mapa de correspondencia – Consumidores habituales [Representación bivariada del Análisis de Correspondencia mostrando tratamientos y descriptores sensoriales; Dimensión 1: 52.6%, dimensión 2: 27.2%].	71
Figura 3. Curva de calibración de ácido gálico (10-150 µg GAE/mL) para determinación de compuestos fenólicos totales mediante método Folin-Ciocalteu.	89
Figura 4. Curva de calibración de quercetina (10-100 µg QE/mL) para determinación de flavonoides totales mediante método de cloruro de aluminio.	90
Figura 5. Curva de calibración de Trolox para determinación de actividad antioxidante mediante ensayo de inhibición del radical DPPH.	90
Figura 6. Cromatograma HPLC de ácidos fenólicos – Tratamiento Control (0.0 g/L extracto de jengibre). Detección: 280 nm (óptima para ácidos hidroxycinámicos).	92
Figura 7. Cromatograma HPLC de ácidos fenólicos - Tratamiento T1 (1.0 g/L extracto de jengibre). Detección: 280 nm.	93
Figura 8. Cromatograma HPLC de ácidos fenólicos Tratamiento T2 (1.5 g/L extracto de jengibre). Detección: 280 nm.	94
Figura 9. Cromatograma HPLC de ácidos fenólicos – Tratamiento T3 (2.0 g/L extracto de jengibre). Detección: 280 nm.	95

Resumen

La cervecería artesanal contemporánea ha experimentado un renovado interés por la diversificación botánica, especialmente en regiones donde el cultivo del lúpulo presenta limitaciones. El jengibre (*Zingiber officinale*), aunque tradicionalmente no empleado en cerveza, posee características aromáticas y funcionales con potencial considerable para su incorporación como agente aromatizante funcional. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de extracto de jengibre sobre las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas, bioactivas y sensoriales de cerveza artesanal fermentada con levadura Kveik (*Saccharomyces cerevisiae*). Se aplicó un diseño experimental completamente aleatorio con cuatro tratamientos: Control (0.0 g/L), T1 (1.0 g/L), T2 (1.5 g/L) y T3 (2.0 g/L) de extracto de jengibre incorporado durante la maduración mediante extracción en frío (21 días, 4 °C). La caracterización integral incluyó análisis fisicoquímicos (pH, acidez, color EBC, contenido alcohólico), microbiológicos (mesófilos aerobios, enterobacterias, bacterias ácido lácticas, mohos y levaduras), bioactivos (compuestos fenólicos totales, flavonoides, capacidad antioxidante DPPH, ácidos fenólicos específicos por HPLC), y evaluación sensorial mediante metodología CATA y hedónica con dos grupos de consumidores no entrenados (n = 200). Los resultados evidenciaron efectos concentración-dependientes no proporcionales con diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$). El contenido alcohólico se mantuvo constante (5.64-5.66% v/v, $p > 0.05$), confirmando la robustez fermentativa de la levadura Kveik. Los compuestos fenólicos totales y flavonoides incrementaron hasta 73.6% y 133.7% respectivamente en T3, mientras que la capacidad antioxidante presentó saturación funcional entre T2 y T3 (41.43% vs 44.36% inhibición DPPH, $p > 0.05$). El análisis HPLC reveló maximización de ácido cafeico en T2 (141.73 mg/L) y aparición selectiva de ácido ferúlico exclusivamente en T3 (28.60 mg/L). La actividad antimicrobiana

presentó umbral crítico: T1 y T2 incrementaron carga microbiana respecto al Control, mientras que T3 demostró efecto antimicrobiano efectivo reduciendo mesófilos aerobios a $2.15 \log_{10}$ UFC/mL y eliminando completamente mohos y levaduras. El análisis sensorial identificó T2 como concentración óptima con perfil distintivo caracterizado por "frescor cítrico" y aceptabilidad comercial en ambos grupos evaluados. Se concluye que T2 (1.5 g/L) optimiza propiedades antioxidantes y sensoriales, mientras que T3 (2.0 g/L) es necesaria para actividad antimicrobiana efectiva. El comportamiento no proporcional documentado constituye el primer reporte científico de este fenómeno en cervecería artesanal con jengibre, estableciendo que la optimización de formulaciones requiere evaluación experimental de concentraciones específicas según propiedades funcionales deseadas. El jengibre representa una alternativa técnicamente viable para diversificación botánica en cervecería artesanal, proporcionando productos funcionalmente enriquecidos con incrementos de hasta 158.9% en capacidad antioxidante manteniendo calidad sensorial y seguridad microbiológica.

Palabras clave: cerveza artesanal, jengibre, Kveik, comportamiento no proporcional, compuestos bioactivos, diversificación botánica

1 INTRODUCCIÓN

La cerveza representa una de las bebidas más antiguas de la humanidad, con evidencia arqueológica que documenta su elaboración desde aproximadamente 9000 a.C., en China (Wang et al., 2021; Li et al., 2023). Durante milenios, la cervecería se caracterizó por una notable diversidad botánica, particularmente en Europa medieval, donde se empleaban mezclas herbales que incluían mirto del pantano (*Myrica gale*), mielenrama (*Achillea millefolium*), hierba de San Juan (*Hypericum perforatum*), artemisa (*Artemisia vulgaris*) por mencionar algunas, estas combinaciones eran conocidas como GRUIT, que combinaban plantas aromáticas y medicinales (Cabras & Higgins, 2016; Verberg, 2020). Esta tradición de diversificación botánica se interrumpió abruptamente en 1516 con la imposición del *Reinheitsgebot* bávaro, que limitó los ingredientes cerveceros exclusivamente a agua, malta de cebada y lúpulo, estandarizando la producción, pero eliminando conocimientos etnobotánicos acumulados durante siglos (Behre, 1999).

En México, las condiciones agroclimáticas presentan limitaciones significativas para el cultivo comercial de lúpulo (*Humulus lupulus*), cuyo desarrollo óptimo requiere climas específicos. Esta restricción geográfica, combinada con el creciente interés de la cervecería artesanal contemporánea por recuperar ingredientes botánicos tradicionales, establece un contexto favorable para explorar alternativas locales con propiedades aromáticas y funcionales documentadas. El jengibre (*Zingiber officinale*), emerge como candidato particularmente prometedor debido a disponibilidad comercial constante en México, su perfil aromático distintivo caracterizado por compuestos como gingeroles y shogaols, y sus propiedades bioactivas ampliamente documentadas (Mao et al., 2019; Sharifi-Rad et al., 2017).

La incorporación de jengibre en matrices cerveceras requiere consideraciones fermentativas específicas. Las levaduras Kveik (*Saccharomyces cerevisiae*), originarias de

Noruega, presentan características únicas que las hacen especialmente adecuadas para procesos experimentales con ingredientes botánicos complejos: fermentación rápida a temperaturas elevadas (30-40 °C), alta tolerancia alcohólica, ausencia de producción de fenoles volátiles indeseables y robustez metabólica que permite procesar matrices con compuestos bioactivos sin comprometer la eficiencia fermentativa (Preiss et al., 2018; Foster et al., 2022). Estas propiedades facilitan la preservación de compuestos termosensibles del jengibre durante etapas post-fermentativas mediante técnicas de extracción en frío (Nutakor et al., 2020).

Tozetto et al., (2019) establecieron precedentes metodológicos empleando 2.0 g/L de jengibre fresco durante maduración, y estudios recientes han explorado propiedades probióticas en cerveza con jengibre (Gaonkar et al., 2024), existe escasa documentación sistemática sobre el efecto de diferentes concentraciones de extracto de jengibre sobre propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales de cerveza artesanal. Nutakor et al., (2020) proporcionaron evidencia sobre propiedades antioxidantes y antimicrobianas del jengibre en bebidas fermentadas, pero sin evaluación de efectos concentración-dependientes en matrices cerveceras específicas.

El objetivo fue generar evidencia científica sobre viabilidad técnica de sustitución parcial o total de lúpulo por jengibre en formulaciones cerveceras artesanales, estableciendo cómo diferentes concentraciones modifican propiedades funcionales y sensoriales del producto final, y determinando concentraciones óptimas según parámetros específicos de calidad. Los resultados pretenden contribuir al desarrollo de cervecería artesanal mexicana mediante integración de ingredientes botánicos locales con fundamento científico, recuperando tradiciones de diversificación botánica con metodología contemporánea.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Cerveza

2.1.1 Definición

La cerveza es una bebida alcohólica obtenida mediante fermentación de mostos elaborados con cereales malteados, principalmente cebada, empleando levaduras del género *Saccharomyces* y agentes aromatizantes como lúpulo (Boulton & Quain, 2013). La normativa mexicana (NOM-199-SCFI-2017) establece que puede incorporar adjuntos amiláceos, aditivos permitidos y sustancias aromatizantes alternativas al lúpulo, como especias, cortezas, flores, raíces y hierbas aromáticas diversas, requiriendo un periodo de maduración para su desarrollo sensorial óptimo (DOF, 2017).

2.1.2 Contexto histórico y diversidad botánica

La elaboración de cerveza se documentó arqueológicamente desde aproximadamente 9000 a.C., con hallazgos de cerveza elaborada con diversos materiales botánicos en Egipto (3500-3400 a.C.) y evidencia de cervecería con hierbas en Grecia durante la Edad de Bronce (Maksoud et al., 2016; Valamoti, 2018).

Behre (1999) documentó sistemáticamente esta diversidad botánica en cervecería europea, identificando numerosas especies vegetales utilizadas históricamente, incluyendo las dos principales: Mirto del pantano (*Myrica gale*) y Lúpulo (*Humulus lupulus*), así como múltiples plantas aromáticas y medicinales secundarias.

Esta tradición de diversificación botánica, sustentada en conocimiento etnobotánico acumulado durante milenios, fue interrumpida por la imposición del *Reinheitsgebot* bávaro en

1516, que estandarizó la producción limitando los ingredientes exclusivamente a agua, malta de cebada y lúpulo (Verberg, 2020).

2.1.3 Producción artesanal

La definición conceptual internacional de cerveza artesanal, se caracteriza por su elaboración en cervecerías independientes con producción limitada, priorizando calidad sensorial, ingredientes seleccionados frecuentemente locales y técnicas tradicionales que permiten diferenciación respecto a producción industrial (Rodríguez, 2023; Bahena, 2024).

2.1.4 Definición legal mexicana

La normativa mexicana, establece criterios específicos: producción independiente, volúmenes reducidos, empleo de métodos tradicionales y predominancia de ingredientes naturales, sin especificar umbrales cuantitativos de volumen o definición precisa de tradicional (DOF, 2017).

2.1.5 Contexto productivo de materias primas en México

El desarrollo de la cervecería artesanal mexicana se fundamenta en ventajas geográficas y productivas específicas para el acceso a materias primas cerveceras. Hidalgo se posiciona como segundo productor nacional de cebada con 20.8 millones de toneladas, estableciendo infraestructura cervecera estratégica en la región centro-oriental de México (INEGI, 2021). Esta disponibilidad regional de materia prima representa una oportunidad significativa para el desarrollo de la industria cervecera artesanal, facilitando el acceso tanto a malta base tradicional como a extractos comerciales estandarizados (Arroyo et al., 2022).

La evolución del mercado de insumos cerveceros en México ha experimentado transformaciones importantes durante las últimas décadas. Históricamente, el acceso a malta se limitaba a grandes volúmenes industriales, restringiendo el desarrollo de cervecería artesanal a productores con alta capacidad de inversión inicial. La disponibilidad actual de extractos de malta comerciales ha democratizado la producción artesanal, permitiendo a pequeños productores e investigadores acceder a materias primas de calidad sin requerimientos de volumen mínimo ni infraestructura de malteado especializada (Arroyo et al., 2022).

2.1.6 Ventajas metodológicas de extractos comerciales

Los extractos de malta no diastáticos representan una alternativa tecnológica que facilita la estandarización en investigación cervecera y producción artesanal a pequeña escala. Estas formulaciones comerciales ofrecen ventajas específicas: composición reproducible entre lotes, eliminación de variables asociadas al proceso de macerado, ausencia de residuos sólidos del grano que requieren filtración adicional y podrían generar variabilidad en análisis espectrofotométricos posteriores, además de su facilidad de almacenamiento y manejo (Palmer, 2017).

La proximidad geográfica entre zonas de producción primaria y centros de transformación artesanal favorece la implementación de conceptos de economía circular en cervecería, donde los productores artesanales pueden establecer relaciones directas con proveedores regionales, asegurando trazabilidad y calidad de las materias primas utilizadas en formulaciones innovadoras como la incorporación de ingredientes botánicos locales. (Aquilani et al., 2015)

2.2 Levadura Kveik

2.2.1 Características genéticas distintivas

Las cepas Kveik *Saccharomyces cerevisiae*, constituyen un grupo genéticamente diferenciado de levaduras domesticadas originarias de Noruega, caracterizado por marcadores genómicos específicos que las distinguen de levaduras tradicionales. (Preiss et al., 2018). Presentan un gen POF negativo, eliminando producción de fenoles volátiles indeseables como 4-vinilguaiacol y 4-vinilfenol (Dippel et al., 2022).

2.2.2 Propiedades fermentativas

Estas levaduras exhiben tolerancia térmica excepcional (30-40 °C), velocidad fermentativa acelerada, alta eficiencia en consumo de azúcares de malta, tolerancia alcohólica elevada y capacidad de floculación pronunciada, permitiendo clarificación natural rápida (Habschied et al., 2022; Foster et al., 2022).

2.2.3 Ventajas para incorporación de ingredientes botánicos

La robustez metabólica de Kveik facilita el procesamiento de matrices complejas conteniendo compuestos bioactivos sin comprometer eficiencia fermentativa. Su fermentación a temperatura elevada, seguida de maduración en frío, permite incorporar ingredientes termosensibles post-fermentativamente mediante técnicas de extracción controlada, preservando compuestos volátiles y fenólicos (Burini et al., (2021). Estudios recientes demuestran que estas levaduras no convencionales representan herramientas fundamentales para innovación en

cervecería artesanal, particularmente en formulaciones con especias y plantas aromáticas (Dippel et al., 2022).

2.3 Jengibre como ingrediente funcional

2.3.1 Definición y características

El jengibre (*Zingiber officinale*), rizoma de la familia *Zingiberaceae*, ha integrado tradiciones culinarias y medicinales durante más de 3000 años, empleándose inicialmente en medicina tradicional asiática para tratamiento de desórdenes digestivos y procesos inflamatorios (Kiyama, 2020).

El conocimiento empírico acumulado ha sido validado progresivamente mediante investigación científica que documenta efectos cardiovasculares (Li et al., 2021), propiedades antioxidantes, antiinflamatorios y antimicrobianas (Al Askar et al., 2020; Shaukat et al., 2023). Posicionando al jengibre como ingrediente funcional en el desarrollo de alimentos con beneficios fisiológicos documentados más allá de su valor nutricional básico. Esta evidencia científica justifica su incorporación en matrices alimentarias innovadoras, incluyendo bebidas fermentadas (Gaonkar et al., 2024).

2.3.2 Composición y compuestos bioactivos del jengibre

El jengibre presenta una composición rica en carbohidratos (60-70%), proteínas (9%), extracto etéreo (3-6%), ceniza (8%), fibra cruda (3-8%) y aceites volátiles (2-3%) (Mahboubi, 2019).

2.3.3 Compuestos aromáticos volátiles

El perfil aromático está determinado por tres familias químicas principales: (1) monoterpenos oxigenados (geraniol, borneol, terpineol, linalol, cineol), (2) sesquiterpenos α -

zingibereno, β -bisabolenos, α -farneseno, curcumenos,) y (3) derivados específicos como zingiberol y acetato de geranilo, responsables de las notas aromáticas características (Zeng et al., 2023).

2.3.4 Fenilalcanoides bioactivos

Entre el 1-3% del peso fresco corresponde a gingeroles, shogaoles y zingerona, compuestos responsables del sabor picante y propiedades bioactivas (Yang et al., 2024). El estudio fitoquímico identifica además compuestos fenólicos, diarylheptanoides, fenilbutenoides, flavonoides, y terpenoides con actividad antioxidante documentada (Carvalho et al., 2021).

2.3.5 Relevancia de compuestos en matriz cervecera

En matrices alcohólicas fermentadas, los gingeroles presentan mayor solubilidad que en sistemas acuosos, favoreciendo su extracción durante maduración. Los sesquiterpenos contribuyen notas aromáticas complejas que complementan perfiles de ésteres, mientras que compuestos fenólicos como ácidos cafeico y ferúlico pueden interactuar con fenoles endógenos de la malta, modificando capacidad antioxidante total y color. La estabilidad de gingeroles versus transformación térmica a shogaoles determina la elección de técnicas de incorporación, favoreciendo métodos post-fermentativos en frío para preservar perfiles bioactivos originales (Chambers & Koppel, 2013).

2.3.6 Aplicaciones del jengibre en bebidas fermentadas

La investigación más relevante sobre incorporación de jengibre en cerveza artesanal fue desarrollada por Tozetto et al. (2019), quienes establecieron precedentes metodológicos mediante

la elaboración de cerveza tipo Pilsen con incorporación de 2.0 g/L de jengibre fresco durante la etapa de maduración. Sus resultados mostraron aceptabilidad sensorial excepcional (92% de aceptación global), perfil fisicoquímico distintivo y diferenciación quimiométrica respecto a cervezas comerciales.

Gaonkar et al. (2024) desarrollaron cerveza de jengibre con propiedades probióticas, demostrando su potencial para productos con doble funcionalidad: sensorial y nutracéutica. Los aspectos de seguridad del jengibre en aplicaciones alimentarias han sido validados por Sloth Weidner & Sigwart (2000), confirmando su aptitud para consumo humano en las concentraciones típicamente empleadas en bebidas.

Nutakor et al. (2020), proporcionaron evidencia sobre las propiedades antioxidantes y antimicrobianas del jengibre en bebidas fermentadas, demostrando que su incorporación incrementa significativamente el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante, validando su potencial como agente bioactivo en matrices cerveceras.

2.4 Aromatización con lúpulo

La aromatización cervecera tradicional con lúpulo emplea tres metodologías principales: (1) adición durante hervido (min 60-90) para extracción de α -ácidos amargos, (2) adiciones al final del hervido (minuto (0-15) para preservar aceites esenciales volátiles, y (3) *dry hopping*, durante la fermentación o post fermentativo para maximizar aromas sin amargor (Palmer, 2017).

2.4.1 Aromatización con ingredientes botánicos no tradicionales

Plantas aromáticas como jengibre requieren consideraciones específicas debido a diferencias en perfil químico y estabilidad térmica. Mientras el lúpulo tolera hervido prolongado debido a la estructura química de humulonas, compuestos termolábiles del jengibre como los gingeroles se degradan a temperaturas elevadas, transformándose en shogaoles con perfil sensorial modificado Goyal et al., 2023).

2.4.2 Factores determinantes de extracción en frío

El método "*cold brew*" o extracción en frío durante maduración (4 °C, 14-21 d) emerge como técnica óptima para ingredientes termosensibles, permitiendo extracción controlada sin degradación térmica (Cruz & López, 2024).

El pH de la matriz cervecera (típicamente 4.2-4.6) favorece la solubilidad de compuestos fenólicos y terpenos, mientras que pH más bajo incrementa extracción de compuestos ácidos. El tiempo de contacto presenta cinética bifásica: extracción rápida inicial de compuestos solubles (primeras 48-72 h), seguida de fase lenta de equilibrio para compuestos lipofílicos (hasta 21 días). La temperatura reducida (4 °C) minimiza reacciones de oxidación y mantiene CO₂ disuelto, estableciendo condiciones anaeróbicas que preservan compuestos sensibles (Palmer, 2017).

2.5 Ácidos fenólicos en cerveza: fundamentos bioquímicos

Los compuestos fenólicos constituyen una clase fundamental de metabolitos secundarios que determinan características organolépticas, estabilidad oxidativa y propiedades funcionales de la cerveza. Estos compuestos, principalmente presentes en la malta y agentes aromatizantes,

incluyen ácidos fenólicos (ácido ferúlico, *p*-cumárico, cafeico, siríngico, vanílico, protocatecoico) y flavonoides (catequina, epicatequina) que contribuyen al perfil sensorial, color, aroma y propiedades antioxidantes (Wannenmacher & Becker 2018).

2.5.1 Metabolismo de compuestos fenólicos durante fermentación alcohólica

Durante la fermentación alcohólica, los ácidos fenólicos experimentan transformaciones enzimáticas catalizadas por levaduras. Los ácidos derivados de la malta, como el ácido ferúlico y *p*-cumárico, pueden convertirse por acción de ciertas levaduras en compuestos volátiles como 4-vinilguaicol, con aroma característico. La incorporación de jengibre introduce compuestos fenólicos adicionales que pueden interactuar con compuestos endógenos de la cerveza, generando perfiles aromáticos complejos y modificaciones en la capacidad antioxidante total (Chambers & Koppel, 2013).

3 JUSTIFICACIÓN

La cervecería artesanal mexicana enfrenta limitaciones técnicas derivadas de restricciones geográficas para el cultivo comercial de lúpulo (*Humulus lupulus*), ingrediente que proporciona propiedades aromáticas, amargor y actividad antimicrobiana. El desarrollo óptimo del lúpulo requiere condiciones agroclimáticas específicas (latitudes 35-55°, temperaturas 15-25 °C) ausentes en la mayor parte del territorio nacional donde predominan climas tropicales y subtropicales (Arroyo et al., 2022). Esta dependencia de lúpulo importado incrementa costos de producción (20-35% del costo total de materias primas) y limita la competitividad de productores nacionales. La incorporación de ingredientes botánicos locales representa oportunidad de diferenciación en un mercado competido.

El jengibre (*Zingiber officinale*) representa un candidato técnicamente viable para diversificación botánica en cervecería mexicana debido a: (1) disponibilidad comercial constante con producción nacional documentada, (2) perfil aromático distintivo caracterizado por compuestos bioactivos (gingeroles, shogaoles, terpenos) que pueden complementar o sustituir parcialmente funciones del lúpulo, y (3) propiedades antioxidantes y antimicrobianas ampliamente documentadas (Mao et al., 2019; Sharifi-Rad et al., 2017).

Esta investigación pretende contribuir al conocimiento científico en dos dimensiones: (1) Metodológica: establecer protocolo estandarizado para incorporación de extracto de jengibre replicable para otros ingredientes botánicos termosensibles, (2) Conocimiento fundamental: generar evidencia sobre mecanismos de interacción entre compuestos bioactivos del jengibre y componentes endógenos de la matriz cervecera mediante identificación de modificaciones específicas del perfil fenólico, validando compatibilidad de levaduras Kveik para procesamiento de matrices botánicas complejas.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de diferentes concentraciones de extracto de jengibre (*Zingiber officinale*) sobre las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas, bioactivas y sensoriales de cerveza artesanal fermentada con levadura Kveik (*Saccharomyces cerevisiae*).

4.2 Objetivos Específicos

1. Determinar la composición química proximal del extracto de jengibre y extracto de malta mediante análisis de humedad, cenizas, extracto etéreo, fibra cruda, proteína y carbohidratos.
2. Cuantificar los parámetros fisicoquímicos (pH, contenido alcohólico, acidez titulable y color EBC) de las cervezas elaboradas con diferentes concentraciones de extracto de jengibre (0.0, 1.0, 1.5 y 2.0 g/L).
3. Cuantificar compuestos fenólicos totales, flavonoides totales, capacidad antioxidante mediante ensayo DPPH, e identificar ácidos fenólicos específicos por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) en las formulaciones desarrolladas.
4. Evaluar la estabilidad microbiológica mediante cuantificación de mesófilos aerobios totales, bacterias ácido lácticas, mohos y levaduras, y enterobacterias en cada tratamiento.
5. Determinar la aceptabilidad sensorial de las cervezas mediante metodología descriptiva CATA (Check-All-That-Apply) y evaluación hedónica con consumidores ocasionales y habituales (n = 200).

5 HIPÓTESIS

“La adición de extracto de jengibre (*Zingiber officinale*) en concentraciones de 1.0 a 2.0 g/L durante la maduración de cerveza artesanal fermentada con levadura Kveik modificará significativamente las propiedades fisicoquímicas (pH, acidez, color), incrementará el contenido de compuestos bioactivos (fenoles totales, flavonoides, capacidad antioxidante), reducirá la carga microbiana (mesófilos aerobios, mohos y levaduras), y generará perfiles sensoriales distintivos de manera concentración-dependiente.”

6 MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Materias primas

6.1.1 Extracto de malta

Se empleó extracto de malta de cebada comercial no diastático en polvo Maltex (Grupo Maltex, Toluca, Estado de México, México), lote MX-2024-087, con especificaciones técnicas certificadas por el proveedor: contenido de extracto $\geq 80\%$, humedad $\leq 6\%$ y pH 5.8-6.2. La selección de extracto comercial sobre malta base tradicional se fundamentó en consideraciones metodológicas específicas: garantizar composición reproducible entre lotes experimentales, eliminar variables del proceso de macerado, mantener matriz base constante para evaluar exclusivamente los efectos del jengibre, y facilitar análisis posteriores mediante ausencia de residuos sólidos del grano.

6.1.2 Extracto de jengibre

El jengibre (*Zingiber officinale*) se obtuvo como extracto liofilizado en polvo (Rancho La Esperanza, Ayotoxco de Guerrero, Puebla, México), lote JNE-2024-03, procesado mediante las siguientes etapas: (1) selección de rizomas frescos de primera calidad (variedad local, cosecha octubre 2023), (2) lavado y desinfección con hipoclorito de sodio 200 ppm, (3) troceado en rodajas de 3-5 mm de espesor, (4) liofilización en equipo industrial FreeZone 18L (Labconco, Kansas City, MO, EE.UU.), y (5) molienda en molino de martillos hasta obtener polvo homogéneo de color característico beige claro, granulometría $< 250 \mu\text{m}$, tamiz malla 60.

6.1.3 Levadura

Se utilizó levadura seca activa *Saccharomyces cerevisiae* biotipo Kveik, cepa Lutra (Omega Yeast Labs, lote OYL-071-2024, Chicago, IL, EE.UU.), caracterizada por alta tolerancia térmica (30-40 °C), fermentación rápida, ausencia de producción de fenoles no deseados (POF-) y marcada capacidad de floculación. La levadura se almacenó en refrigeración a 4 °C hasta su rehidratación e inoculación.

6.1.4 Agua

El agua empleada se obtuvo de purificadora comercial Agua Cristal (Tulancingo, Hidalgo, México), previamente tratada mediante filtración multinivel (sedimentos, carbón activado, ósmosis inversa) para eliminación de cloro residual, metales pesados y compuestos orgánicos. El agua presentó características fisicoquímicas apropiadas para elaboración cervecera: pH 7.02 ± 0.2 , dureza total 180 ± 10 mg CaCO₃/L, dureza temporal 120 ± 8 mg CaCO₃/L, calcio 45 ± 3 mg/L, magnesio 12 ± 2 mg/L, sulfatos 35 ± 5 mg/L, cloruros 25 ± 3 mg/L, sodio 18 ± 2 mg/L, y ausencia de metales pesados (< 0.01 mg/L), cumpliendo con especificaciones para producción de cerveza artesanal según Palmer (2017) y NOM-127-SSA1-2021 para agua potable.

6.1.5 Reactivos y soluciones

Los reactivos y soluciones empleados en el desarrollo experimental incluyen sanitizantes compuestos por ácido fosfórico al 50% y ácido dodecibencenosulfónico (ADBS) al 15%, formulación comercial StarSan (Five Star Chemicals & Supply Inc., Colorado, EE.UU.) utilizado

para la higienización de equipos y superficies en contacto con el producto durante todas las etapas de elaboración.

Para calibración del potenciómetro se emplearon soluciones buffer estándar de pH 4.0 y 7.0. El agua destilada se utilizó como disolvente para preparación de soluciones analíticas en determinaciones espectrofotométricas y microbiológicas. Para análisis cromatográfico por HPLC, se empleó agua y ácido acético glacial grado HPLC y reactivos grado analítico según especificaciones detalladas en la sección 6.5.4.

Los estándares analíticos específicos incluyen ácido gálico para compuestos fenólicos totales (6.5.1), quercetina para flavonoides (6.5.2), Trolox para capacidad antioxidante DPPH (6.5.3), y estándares de ácidos fenólicos individuales (Sigma-Aldrich, pureza $\geq 98\%$ grado HPLC) para identificación cromatográfica (6.5.4). Los medios de cultivo microbiológicos se especifican en la sección 6.6.2.

6.2 Diseño experimental

Se implementó un diseño experimental completamente aleatorio (DCA) sin bloqueos ni covariables, evaluando el efecto de un factor (concentración de extracto de jengibre) en cuatro niveles: Control (0.0 g/L), T1 (1.0 g/L), T2 (1.5 g/L) y T3 (2.0 g/L).

6.2.1 Estructura de replicación

Cada tratamiento se replicó tres veces mediante elaboración de lotes de cerveza independientes (réplicas biológicas verdaderas), totalizando 12 unidades experimentales (4 tratamientos $\times$ 3 réplicas biológicas). Cada lote individual consistió en 18 L de mosto fermentado bajo condiciones controladas idénticas. Las réplicas biológicas se procesaron en días consecutivos (máximo 48 h entre lotes) para minimizar variación temporal, empleando las mismas materias primas (mismo lote de extracto de malta MX-2024-087, mismo lote de jengibre JEN-2024-03, misma preparación de levadura) y condiciones ambientales controladas (temperatura de sala de elaboración 21 ± 2 °C, humedad relativa $60 \pm 5\%$).

6.2.2 Réplicas analíticas

Todos los análisis (fisicoquímicos, microbiológicos, bioactivos) se realizaron por triplicado a partir de cada réplica biológica ($n = 3$ réplicas analíticas por réplica biológica), obteniendo 9 datos totales por tratamiento para cada parámetro evaluado (3 réplicas biológicas $\times$ 3 réplicas analíticas). Los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar de las réplicas biológicas ($n = 3$), calculadas a partir de los promedios de las réplicas analíticas correspondientes a cada lote.

6.2.3 Aleatorización

Los lotes se procesaron siguiendo secuencia aleatoria generada mediante tabla de números aleatorios (software R versión 4.3.1, función `sample()`) para eliminar efectos sistemáticos de orden temporal y variables ambientales no controladas. El extracto de jengibre se incorporó inmediatamente al completar la fermentación de cada lote individual (densidad objetivo 1.010 ± 0.002 g/mL), asegurando condiciones post-fermentativas equivalentes para todos los tratamientos.

6.2.4 Control experimental

El tratamiento Control (0.0 g/L) sin adición de jengibre constituyó el control negativo apropiado, permitiendo evaluar el efecto específico del jengibre versus la matriz base (cerveza elaborada con extracto de malta + levadura Kveik). Este diseño evitó introducción de variables confusas que generarían comparaciones con lúpulo, considerando la existencia de más de cien variedades comerciales de (*Humulus lupulus*), cada una con perfiles químicos y sensoriales distintivos (Almaguer et al., 2014).

El diseño experimental siguió principios establecidos para caracterización de cervezas artesanales con aditivos botánicos según metodologías reportadas por Lataza Rovalletti et al. (2020) y Martínez et al. (2017).

6.3 Descripción del proceso cervecero

6.3.1 Proceso de elaboración del mosto

Se preparó mosto base utilizando 131 g/L de extracto de malta en polvo según las recomendaciones de Palmer (2017) para cervezas de densidad estándar, concentración que permite obtener densidad inicial de 1.050-1.055 g/mL y contenido alcohólico final de 5-6% v/v tras fermentación completa.

El proceso inició calentando 18 L de agua filtrada desde temperatura ambiente (20 ± 2 °C) hasta ebullición vigorosa (98-100 °C a altitud de 2,157 msnm, presión atmosférica ~560 mmHg) en olla de cocción Digiboil KL07245 (Kegland, Melbourne, Victoria, Australia) con sistema de calentamiento eléctrico 110-120V, 1800W. El agua se mantuvo en ebullición durante 15 min para eliminación de compuestos volátiles indeseables como cloro residual, o dimetilsulfuro y sanitización del sistema.

Transcurridos los 15 min de pre-ebullición, se redujo temporalmente la intensidad de calentamiento (potencia 40%, temperatura ~ 85 °C) y se añadió gradualmente el extracto de malta en polvo (2.36 kg totales para 18 L, equivalente a 131 g/L) mediante incorporación lenta con agitación manual constante utilizando paleta de acero inoxidable 316, distribuyendo el polvo sobre la superficie del agua en corriente fina durante 8-10 min para evitar formación de grumos y caramelización localizada. La agitación se mantuvo vigorosa durante todo el proceso de incorporación para asegurar disolución completa y homogeneización.

Una vez incorporado completamente el extracto de malta, se incrementó nuevamente la potencia de calentamiento al 100%, (temperatura 98-100 °C) y se mantuvo la mezcla en ebullición suave pero constante durante 60 min. Durante la ebullición se monitoreó formación de espuma

proteica en los primeros 10-15 min, controlando intensidad de ebullición para evitar desbordamiento. No se realizó adición de lúpulo ni otros agentes amargantes durante esta etapa.

6.3.2 Enfriamiento y ajuste de volumen

Al completar los 60 min de ebullición, se procedió inmediatamente al enfriamiento rápido del mosto utilizando intercambiador de calor tipo serpentín de acero inoxidable 316 con eficiencia térmica del 85% (Kegland, Melbourne, Victoria, Australia), alimentado con agua de red a temperatura 18-20 °C con flujo constante de 8 L/min. El enfriamiento se realizó con recirculación del mosto mediante bomba centrífuga sanitaria (Chugger, California, EE.UU.) a razón de 12 L/min, reduciendo la temperatura desde 98 °C hasta 35 ± 1 °C en 25-30 min, minimizando riesgo de contaminación y preservando compuestos termolábiles.

Durante el enfriamiento se aforó el volumen a 18.0 ± 0.1 L mediante adición de agua esterilizada previamente hervida y enfriada, compensando pérdidas por evaporación durante la ebullición (volumen inicial 18 L, evaporación aproximada 1.5-2.0 L durante 60 min de ebullición, reposición controlada para volumen final exacto).

6.3.3 Verificación de parámetros del mosto

Al alcanzar la temperatura objetivo (35 ± 1 °C), se verificó densidad inicial empleando densímetro de vidrio calibrado (rango 0.980-1.100 g/mL, precisión ± 0.001 , certificado de calibración vigente), obteniendo valores de 1.052 ± 0.003 g/mL. Simultáneamente se midió pH mediante potenciómetro PHS 3E (Hinotek, Shanghai, China) previamente calibrado con

soluciones buffer estándar pH 4.0 y 7.0, registrando valores de 5.2 ± 0.1 unidades de pH, apropiados para fermentación con levadura Kveik.

6.3.4 Fermentación

La levadura Kveik se rehidrató en agua estéril a 35 °C durante 15 min según las especificaciones del fabricante, utilizando 0.5 g/L de levadura *Saccharomyces cerevisiae* cepa Lutra (Omega Yeast Labs, Chicago, IL, EE.UU.). El mosto se inoculó con esta levadura activa para asegurar fermentación vigorosa y tiempo de latencia mínimo. La fermentación se realizó a 35 ± 1 °C en fermentador Bucket buddy + Heating KL20695 (Kegland, Melbourne, Victoria, Australia) de acero inoxidable 304 con capacidad de 35 L, equipado con sistema de calentamiento eléctrico, chaqueta de neopreno y válvula de escape de CO₂.

La temperatura elevada característica de levaduras Kveik permitió fermentación rápida sin producción de sabores no deseados (Preiss et al., 2018). El tiempo de fermentación se monitoreó mediante medición de densidad cada 12 h utilizando densímetro calibrado, considerándose completa al alcanzar densidad estable de 1.010 ± 0.002 g/mL. Se registraron temperatura, densidad y pH al final de la fermentación, verificando ausencia de contaminación mediante inspección visual y olfativa. El contenido alcohólico se determinó mediante densimetría.

6.3.5 Aplicación de tratamientos con jengibre

El extracto de jengibre se añadió inmediatamente al completar la fermentación de cada lote individual, asegurando que todos los lotes recibieran la adición en las mismas condiciones post-fermentativas. Este protocolo evitó interferencia con el metabolismo fermentativo, maximizó la

extracción de compuestos bioactivos del jengibre durante la maduración mediante técnica de extracción en frío, eliminó variables temporales entre lotes y garantizó condiciones equivalentes de incorporación del agente aromatizante (Cruz & López 2024).

Los tratamientos se sometieron a maduración en frío a 4 ± 1 °C bajo 1 bar de presión de CO₂, durante 21 d en tanques de maduración Barril Pet-Vinil MonoBar de 35 L grado alimentario (Kegland, Melbourne, Victoria, Australia) con cabezal equipado con puertos de CO₂, salida de cerveza y válvula de alivio. Estas condiciones favorecieron la extracción de las muestras, así como clarificación natural y desarrollo de características sensoriales sin fermentación secundaria (Kunze, 2014).

6.3.6 Proceso de acabado

Después de la maduración, se realizó trasiego cuidadoso utilizando bomba centrífuga sanitaria de acero inoxidable 304 con capacidad de 15 L/min (Chugger, California, EEUU.) para separar la cerveza clarificada de sedimentos. Se verificó la ausencia de partículas suspendidas y se ajustó carbonatación a 2.5 volúmenes de CO₂. La cerveza se embarriló en barriles Pet-Vinil MonoBar grado alimentario previamente sanitizados con StarSan (Five Star Chemicals & Supply Inc., Colorado EE.UU.), se almacenó a 4 °C bajo 1 bar de presión de CO₂ grado alimenticio en refrigeración hasta completar los análisis, etiquetando muestras con código de tratamiento y fecha de elaboración (Goyal et al., 2023).

6.3.7 Control de calidad del proceso

Se implementaron medidas de control de calidad en puntos críticos para asegurar reproducibilidad de los resultados experimentales. Todos los equipos en contacto con el producto se higienizaron con StarSan según los protocolos establecidos por Bamforth (2021). Durante el proceso se registraron temperatura, densidad, pH y se verificó ausencia de contaminación visual en todas las etapas, manteniendo trazabilidad completa de materias primas, condiciones de proceso y tiempos de fermentación.

6.4 Análisis químico proximal de la materia prima

Se realizó caracterización composicional del extracto de jengibre y malta mediante análisis químico proximal para determinar humedad, cenizas, extracto etéreo, fibra, proteínas y carbohidratos. Esta caracterización permitió establecer especificaciones técnicas y aportes nutricionales de las materias primas empleadas.

6.4.1 Determinación de humedad

Se aplicó el método AOAC 925.09 (2005) por secado en horno usando balanza analítica Adventurer AX423/E (Ohaus, Parsippany, NJ, EE.UU.). Se pesaron 2 g de muestra homogénea en vidrios de reloj previamente llevados a peso constante, se secaron en horno de flujo horizontal TE-FH45DM (Terlab, Zapopan, Jalisco, México) a 130 ± 3 °C durante 1 h, se transfirieron a desecador durante 30 min y se pesaron. El porcentaje de humedad se calculó mediante la ecuación (1):

$$\% \text{ Humedad} = \left[\frac{(W1 - W2)}{W} \right] \times 100 \quad (1)$$

Donde: W_1 = Peso del vidrio + muestra húmeda (g), W_2 = Peso del vidrio + muestra seca (g), W = Peso de la muestra (g).

6.4.2 Determinación de cenizas

Se utilizó el método AOAC 923.03 (2015) de calcinación en mufla FE-361, (Felisa, Zapopan, Jalisco, México). Se pesaron 5 g de muestra en cápsulas de porcelana previamente llevadas a peso constante, se realizó pre-carbonización con mechero Bunsen seguida de calcinación completa en mufla a 525 °C durante 5 h. Las muestras se enfriaron a 200 °C, se transfirieron a desecador durante 1 h y se pesaron. El porcentaje de cenizas se calculó mediante la ecuación (2):

$$\% \text{ Cenizas} = \left[\frac{(W_1 - W_2)}{W} \right] \times 100 \quad (2)$$

Donde: W_1 = Peso del crisol + muestra calcinada (g), W_2 = Peso del crisol vacío (g), W = Peso de la muestra (g).

6.4.3 Determinación de extracto etéreo

Se aplicó el método AOAC 2005 y NMX-F-089-S-1978 utilizando sistema de extracción Soxhlet E816-HE (Büchi, Flawil, Suiza.). Se emplearon 6 g de muestra previamente secada, colocadas en dedales Whatman y sometidas a extracción con éter de petróleo (30-75 °C) durante 2 horas con sesiones de lavado y secado de 10 min cada una. El porcentaje de extracto etéreo se calculó mediante la ecuación (3):

$$\% \text{ Extracto etéreo} = \left[\frac{(W_1 - W_2)}{W} \right] \times 100 \quad (3)$$

Donde: W_1 = Peso del matraz + grasa extraída (g), W_2 = Peso del matraz vacío (g), W = Peso de la muestra (g).

6.4.4 Determinación de fibra cruda

Se empleó el método gravimétrico AOAC 962.09 (1990) utilizando 2g de muestra desengrasada. Se realizó digestión ácida mediante determinador de fibra LAC300001-00 (Labconco, Kansas City, MO, EE.UU.) con 200 mL de H_2SO_4 diluido en ebullición durante 30 min, seguida de digestión alcalina hasta pH neutro. El residuo se secó a 130 °C durante 2 h y se calcinó en mufla a 600 °C durante 30 min. El porcentaje se calculó mediante la ecuación (4):

$$\% \text{ de fibra cruda} = \left[\frac{\text{Peso seco} - \text{Peso calcinado}}{\text{Peso muestra}} \right] \times 100 \quad (4)$$

6.4.5 Determinación de proteína

Se aplicó el método Kjeldahl según AOAC 955.04 (2005) y NMX-F-608-2011 empleando 1 g de muestra. La digestión se realizó mediante digestor K-425/K/436 (Büchi, Flawil, Suiza) con 5 mL de agua destilada, 15 mL de H_2SO_4 (98%) y una tableta catalizadora Kjeltabs CX, con programa de temperatura: 230 °C (30 min) → 260 °C (5 min) 300 °C (5 min) 405 °C (30 min) hasta obtener coloración verde esmeralda. La destilación se realizó con destilador automático K-355 (Büchi, Flawil, Suiza), mediante adición de H_3BO_3 al 3% (pH 4.6-4.7) y titulación con HCl 0.1N hasta viraje de amarillo a rosa con indicador rojo de metilo.

El porcentaje de nitrógeno se calculó mediante la ecuación (5):

$$\%N = \frac{(mL\ problema - mL\ blanco) \times (meq\ N)(Normalidad\ H_2SO_4)}{Peso\ muestra} \times 100$$

(5)

El porcentaje de proteína se determinó como: % Proteína = %N $\times$ 6.25, donde 6.25 es el factor de conversión estándar para proteínas vegetales.

6.4.6 Determinación de carbohidratos

Los carbohidratos se calcularon por diferencia según la ecuación (6):

$$\begin{aligned} \% Carbohidratos \\ &= 100 - (\% Humedad + \% Cenizas + \% Extracto\ etéreo + \% Fibra \\ &\quad + \% Proteína) \end{aligned}$$

(6)

6.5 Metodología de análisis fisicoquímico

6.5.1 Preparación general de muestras

Todas las muestras de cerveza se desgasificaron previamente mediante agitación suave en matraz de 500 mL a 20 °C en parrilla con agitación magnética, según metodología de Popescu et al., (2013). Posteriormente se filtraron usando papel filtro seco para eliminar partículas suspendidas. Este procedimiento se repitió para garantizar eliminación completa de CO₂ antes de los análisis.

6.5.2 Determinación de pH

El pH se determinó en muestras desgasificadas utilizando potenciómetro PHS 3E (Hinotek, Shanghai, China) previamente calibrado con soluciones buffer estándar de pH 4.0 ± 0.01 y 7.0 ± 0.01 a 20 °C (trazables a estándares NIST). El método siguió el protocolo AOAC 945.10 (2019) y método ASBC Beer-9 (American Society of Brewing Chemists, 2024) para determinación de pH en cerveza.

Las mediciones se realizaron por triplicado a temperatura ambiente. Entre mediciones, el electrodo se enjuagó con agua destilada y se secó suavemente con papel absorbente libre de pelusa. Los resultados se reportaron como unidades de pH expresadas como media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$ réplicas analíticas por cada réplica biológica).

6.5.3 Determinación de contenido alcohólico

La determinación de etanol se basó en el método densimétrico AOAC 920.57 (2016) y ASBC Beer-4 (American Society of Brewing Chemists, 2024), fundamentado en la diferencia de densidad entre etanol (0.789 g/mL a 20 °C) y agua (0.998 g/mL a 20 °C). Se utilizó densímetro de vidrio calibrado con certificado de trazabilidad (rango 0.980-1.100 g/mL, división mínima 0.001, precisión ± 0.001 , fabricante Alla France, París, Francia) y termómetro de mercurio de precisión calibrado (rango 0-100 °C, división 0.1 °C, precisión ± 0.1 °C) en probeta de vidrio de 250 mL.

Las muestras desgasificadas se llevaron a baño de agua con control de temperatura (Thermo Scientific TSGP10, Waltham, MA, EE.UU.) hasta alcanzar exactamente 20.0 ± 0.1 °C. Se transfirieron 200 mL de muestra a probeta limpia y seca, se introdujo el densímetro cuidadosamente evitando formación de burbujas, y se esperó estabilización durante 2-3 minutos. La lectura se realizó en el menisco inferior del líquido a nivel del ojo, registrando densidad inicial del mosto antes de fermentación (ρ_i) y densidad final de la cerveza terminada (ρ_f).

El contenido de etanol se calculó mediante la ecuación (7):

$$\% Etanol \left(\frac{v}{v} \right) = (\rho_i - \rho_f) \times K \quad (7)$$

Donde $K = 131.25$ es el factor de corrección estándar derivado de tablas AOAC y ASBC para el rango cervecero (gravedad específica 1.010-1.060), considerando la contribución de etanol, extracto residual y CO₂ disuelto. Los resultados se expresaron como porcentaje de etanol en volumen (% v/v) con precisión de $\pm 0.01\%$, reportando media $\pm$ desviación estándar de tres determinaciones independientes.

6.5.4 Determinación de acidez titulable

Se titularon 50 mL de cerveza desgasificada con solución NaOH 0.1M en presencia de fenolftaleína como indicador, según Koren et al. (2020). La titulación se realizó hasta aparición de color rosa pálido persistente durante 1 min. La acidez titulable se calculó mediante la ecuación (8):

$$Acidez\ titulable\ (\% \text{ ácido láctico}) = \frac{(V \times 0.1 \times 0.090 \times 100)}{50}$$

(8)

Donde: V = Volumen de NaOH 0.1M utilizado (mL), 0.090 = Peso molecular del ácido láctico (g/mol), 50 = Volumen de muestra (mL). Los resultados se expresaron como porcentaje de ácido láctico (media $\pm$ desviación estándar, n=3).

6.5.5 Determinación de color EBC

La determinación del color se realizó según el método estándar EBC (European Brewery Convention, 1975) descrito por Koren et al. (2020), basado en la absorción de luz a 430 nm. Las muestras desgasificadas se analizaron en celdas UV-Vis de 1 cm de paso óptico utilizando espectrofotómetro UV-1280 (Shimadzu, Kyoto, Japón). Se realizaron tres repeticiones por muestra y los valores EBC se calcularon multiplicando la absorbancia obtenida por el factor numérico de 25, mediante la ecuación (9):

$$Color\ EBC = Absorbancia\ 430nm \times 25$$

(9)

Los resultados se reportaron como unidades EBC (European Brewery Convention), expresados como media $\pm$ desviación estándar (n=3).

6.6 Metodología parámetros funcionales

6.6.1 Determinación de compuestos fenólicos totales

La cuantificación de compuestos fenólicos totales se realizó mediante el método espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu según Ainsworth & Gillespie (2007), basado en la reducción del reactivo por grupos fenólicos en medio alcalino. Se preparó curva de calibración utilizando ácido gálico G7384 (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EE.UU.) como estándar en el rango de 10-150 µg GAE/mL, obteniendo linealidad adecuada ($R^2 = 0.9725$) con ecuación $y = 0.0048x - 0.0651$ (Figura 4).

Las muestras de cerveza se diluyeron 1:10 con agua destilada. Se tomaron 150 µL de muestra diluida y se añadieron secuencialmente 600 µL de agua destilada, 750 µL de reactivo Folin-Ciocalteu al 10% y 750 µL de solución Na_2CO_3 al 7.5%. La mezcla se incubó en oscuridad durante 30 min a temperatura ambiente y la absorbancia se midió a 760 nm utilizando espectrofotómetro Genesys 10S UV-Vis (Thermo Scientific, Waltham, MA, EE.UU.). Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico por ml de muestra (mg GAE/mL), calculados mediante la ecuación de la curva de calibración (véase curva de calibración en Anexo A, Figura 3).

6.6.2 Determinación de flavonoides totales

La cuantificación de flavonoides totales se realizó según el método descrito por Ainsworth & Gillespie (2007), basado en la formación de complejos estables entre flavonoides y cloruro de aluminio. Se estableció curva de calibración con quercetina como estándar en el rango de 10-100 µg QE/mL. La curva presentó óptima linealidad ($R^2 = 0.98$) con ecuación $y = 0.0047x + 0.0994$ (Figura 5).

Se preparó mezcla de reacción combinando 100 μ L de muestra, 560 μ L de agua destilada, 1500 μ L de etanol al 95%, 20 μ L de acetato de potasio 1M y 20 μ L de $AlCl_3$ al 10%. La mezcla se mantuvo en reposo durante 30 min en oscuridad. La absorbancia se midió a 415 nm utilizando espectrofotómetro Genesys 10S UV-Vis (Thermo Scientific, Waltham, MA, EE.UU.), empleando etanol al 95% como blanco. Los resultados se expresaron como μ g equivalentes de quercetina por mL de muestra (μ g QE/mL), calculados mediante la ecuación de regresión lineal (véase Anexo A, Figura 4).

6.6.3 Ensayo de inhibición del radical DPPH

La actividad antioxidante se determinó mediante el porcentaje de inhibición del radical libre DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) según Brand-Williams et al. (1995), basado en la reducción del radical púrpura por compuestos antioxidantes. Se utilizó Trolox (ácido 6-hidroxil-2,5,7,8-tetrametilcromano-2-carboxílico) como antioxidante de referencia en el rango de 99-113 μ g TEAC/mL, estableciendo la relación entre concentración y porcentaje de inhibición (Figura 6).

Se preparó solución DPPH en etanol hasta obtener absorbancia inicial apropiada y las muestras se prepararon en etanol para compatibilidad con el sistema. Se prepararon tubos con volumen final de 2.0 mL: tubo blanco (1.0 mL etanol + 1.0 mL etanol), tubo control (1.0 mL etanol + 1.0 mL solución DPPH) y tubo muestra: (1.0 mL muestra + 1.0 mL solución DPPH). Las mezclas se mantuvieron alejadas de la luz durante 30 min. La absorbancia se midió a 517 nm utilizando espectrofotómetro Genesys 10S UV-Vis (Thermo Scientific, Waltham, MA, EE.UU.).

El porcentaje de inhibición se calculó mediante la ecuación (10):

$$\% \text{ Inhibición DPPH} = \frac{(Abs \text{ control} - Abs \text{ muestra})}{(Abs \text{ control})} \times 100$$

(10)

Donde: Abs control es la absorbancia del DPPH sin antioxidante y Abs muestra es la absorbancia del DPPH con muestra. Los resultados se expresaron como porcentaje de inhibición del radical DPPH.

6.6.4 Identificación de ácidos fenólicos por HPLC

La identificación de compuestos fenólicos se realizó mediante cromatografía líquida de alta resolución YL9100 (Young Lin Instrument Co., Anyang, Corea del Sur), empleando la técnica propuesta por Kawa-Rygielska (2022) con modificaciones específicas para la matriz cervecera evaluada. Se utilizó columna de fase reversa C18 SiliaChrom MONO HPL-S03205E-A-N250 (SiliCycle, Quebec City, Quebec, Canadá) con dimensiones: 4.6 × 250 mm, tamaño de partícula: 5 μm y tamaño de poro: 100 Å.

Las muestras de cerveza se desgasificaron mediante agitación magnética durante 10 minutos a temperatura ambiente y se filtraron utilizando discos de membrana de 0.22 μm (Millipore, Burlington, MA, EE.UU.) para eliminar partículas suspendidas, analizándose directamente sin diluciones adicionales. Se utilizaron estándares de ácidos fenólicos Sigma-Aldrich con pureza ≥98% (grado HPLC) preparados en agua:metanol (50:50 v/v) en concentraciones de 20 - 500 mg/L, analizando cada concentración por duplicado para establecer curvas de calibración mediante regresión lineal.

Las condiciones cromatográficas incluyeron temperatura de columna: 35°C, tiempo total de análisis: 32 min, Volumen de inyección: 20 μL y detección: UV-Vis a tres longitudes de onda

(254, 280 y 320 nm). Las fases móviles empleadas fueron: Fase A (agua:ácido acético glacial 99:1 v/v) y Fase B (metanol:ácido acético glacial 99:1 v/v), aplicando el gradiente cromatográfico descrito en la Tabla 1.

Tabla 1.

Condiciones de gradiente cromatográfico para análisis de ácidos fenólicos mediante HPLC

Tiempo (min)	Fase A (%)	Fase B (%)	Flujo (mL/min)	Presión (psi)	Tipo
0-10	80	20	0.7	750	Gradiente
10-15	0	100	0.35	750	Gradiente
15-18	0	100	0.35	750	Isocrático
18-20	20	80	0.35	680	Gradiente
20-28	20	80	1.0	1800	Isocrático
28-30	80	20	1.0	1900	Gradiente
31-32	80	20	0.2	600	Isocrático

Condiciones adicionales: Fase A: agua:ácido acético (99:1 v/v); Fase B: metanol:ácido acético (99:1 v/v); Temperatura de columna: 35°C; Volumen de inyección: 20 µL; Detección UV: 254, 280, 320 nm. Tiempo total de análisis: 32 minutos por muestra.

Los cromatogramas se analizaron utilizando software Clarity 6.1 (DataApex, Praga, República Checa) para identificación, integración y cuantificación de ácidos fenólicos. La identificación se basó en coincidencia de tiempos de retención (± 0.1 min) con estándares, confirmación espectral UV en las tres longitudes de onda y linealidad en curvas de calibración ($R^2 \geq 0.99$). Se incluyeron controles de calidad en cada secuencia: blanco de fase móvil, estándares de verificación y duplicados de muestra (CV < 5%).

El método se adaptó específicamente para análisis de ácidos fenólicos en cerveza mediante optimización del gradiente cromatográfico, incorporación de detección múltiple UV y extensión del tiempo de análisis a 32 minutos para resolución completa de picos. Las concentraciones se

expresaron en mg/L como media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Los cromatogramas representativos de cada tratamiento se presentan en el Anexo B (Figuras 6-9).

6.7 Metodología de análisis microbiológico

6.7.1 Toma y preparación de muestras

Las muestras se tomaron durante el período de almacenamiento de las cervezas a partir del día 21 de post-maduración, bajo condiciones asépticas para evitar contaminación externa. Se recolectaron muestras representativas de 50 mL de cada tratamiento (Control, T1, T2, T3) en recipientes estériles de polipropileno.

La preparación se realizó de acuerdo con los procedimientos establecidos en NOM-110-SSA1-1994 (preparación y dilución de muestras de alimentos para análisis microbiológico) y NMX-F-464-1982 (métodos de análisis microbiológico de alimentos). Se prepararon diluciones seriadas 10^{-1} en condiciones asépticas utilizando caldo peptonado estéril (15 g/L) como diluyente, homogeneizando mediante agitación en vórtex durante 30 seg.

6.7.2 Medios de cultivo y preparación

Los medios de cultivo empleados fueron: Agar para Conteo Estándar (PCA, 23.5 g/L), Agar Bilis Rojo Violeta (VRBA, 41.5 g/L), Agar Papa Dextrosa (PDA, 39 g/L), Agar Man Rogosa Sharpe (MRS, 67 g/L) y Caldo peptonado (15 g/L). Todos los medios se prepararon con agua destilada siguiendo especificaciones del fabricante y se esterilizaron en autoclave modelo 75X, (All American, Winsconsin Aluminium Foundry Co., Inc., Manitowoc, WI, EE.UU.) a 121 °C durante 15 min.

6.7.3 Procedimientos de análisis por grupo microbiano

Se realizó conteo de mesófilos aerobios totales utilizando PCA según NOM-110-SSA1-1994, enterobacterias empleando VRBA siguiendo NOM-114-SSA1-1994, mohos y levaduras utilizando PDA acidificado según ISO 21527-1:2008, y bacterias ácido lácticas empleando MRS según NMX-F-464-1982.

Las siembras se realizaron mediante técnica aséptica utilizando mechero Bunsen en área de trabajo previamente desinfectada con alcohol al 70%, inoculando 0.1 mL de muestra y dilución 10^{-1} por duplicado mediante técnica de extensión en superficie.

6.7.4 Condiciones de incubación e identificación

Todas las placas se mantuvieron en incubadora LOM-80 (MRC Lab, Holon, Israel) a 35 ± 1 °C durante 48 h. Después del período de incubación se contaron únicamente placas con 30-300 colonias para garantizar precisión estadística, seleccionando colonias características de cada grupo microbiano según morfología y características de crecimiento específicas en cada medio.

La concentración microbiana se calculó utilizando la fórmula (11):

$$\frac{UFC}{mL} = \frac{N^{\circ} \text{ de colonias}}{\text{Volumen inoculado (mL)} \times \text{Factor de dilución}} \quad (11)$$

Expresando los resultados como $\log_{10}$ UFC/mL para facilitar análisis estadístico y comparación entre tratamientos.

6.7.5 Límites microbiológicos de referencia e interpretación

Los recuentos microbiológicos se interpretaron según criterios de la NOM-199-SCFI-2017 (Bebidas alcohólicas - Cerveza), que especifica ausencia de microorganismos patógenos sin límites numéricos para mesófilos totales debido a la naturaleza fermentativa del producto, y la NOM-210-SSA1-2014 (Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos), que establece <100 UFC/mL para mesófilos aerobios en bebidas carbonatadas como referencia adaptada. Se emplearon umbrales de calidad para cerveza artesanal según Priest & Campbell (2003) y Boulton & Quain (2013): mesófilos aerobios $<10^3$ UFC/mL (aceptable), 10^3 - 10^4 UFC/mL (riesgo moderado), $>10^4$ UFC/mL (inaceptable); bacterias ácido lácticas $<10^3$ UFC/mL; mohos y levaduras no-*Saccharomyces* $<10^2$ UFC/mL (aceptable), $>10^3$ UFC/mL (riesgo de refermentación); y ausencia de enterobacterias en 1 mL. Las diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos se emplearon para evaluar el efecto antimicrobiano relativo del jengibre, independientemente del cumplimiento absoluto con límites normativos.

6.8 Metodología del análisis sensorial

Se realizó evaluación sensorial para determinar el impacto de diferentes concentraciones de extracto de jengibre sobre las características sensoriales y aceptabilidad de cerveza artesanal, aplicando metodología CATA (Check-All-That-Apply) conjuntamente con escala hedónica para correlacionar atributos sensoriales específicos con preferencias del consumidor. El diseño del análisis siguió principios establecidos por Ares, G., Jaeger, S.R. (2015) & Meilgaard, M., Civille, 2016).

6.8.1 Selección y caracterización de panelistas

Se realizaron sesiones de evaluación sensorial con dos grupos de consumidores no entrenados mayores de 18 años, totalizando 200 participantes ($n = 200$). El reclutamiento se realizó mediante convocatoria dirigida según metodología de Meilgaard et al. (2016) para evaluación sensorial con consumidores. Se conformaron dos grupos: Grupo 1 - consumidores ocasionales ($n = 100$), estudiantes y personal del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la UAEH, clasificados según frecuencia de consumo de cerveza de 1-4 veces por mes y experiencia con cerveza artesanal esporádica (< 6 cervezas artesanales diferentes en el último año); y Grupo 2 - consumidores habituales ($n = 100$), reclutados en establecimiento especializado (La Biznaga, Tulancingo, Hidalgo), clasificados según frecuencia de consumo ≥ 2 veces por semana y experiencia regular (≥ 10 cervezas artesanales diferentes en el último año) con capacidad declarada de diferenciar estilos cerveceros básicos.

Los criterios de inclusión fueron edad entre 18-88 años, ausencia de alergias alimentarias conocidas a ingredientes de la cerveza o jengibre, consumo ocasional o habitual de bebidas alcohólicas fermentadas, y participación voluntaria mediante firma de consentimiento informado.

Los participantes no recibieron entrenamiento sensorial previo, correspondiendo a la categoría de "consumidores no entrenados" según ISO 11136:2014, proporcionándose únicamente una sesión informativa breve de 5 min, sobre el procedimiento de evaluación, uso de escalas y derechos de los participantes.

6.8.2 Preparación y presentación de muestras

Las muestras se presentaron en vasos de plástico transparente de 100 mL codificados con números aleatorios de tres dígitos, manteniendo temperatura de servicio a 4 ± 1 °C mediante refrigeración controlada. El volumen de muestra fue de 30 mL por tratamiento para permitir evaluación completa sin fatiga sensorial. La presentación de tratamientos siguió orden aleatorio balanceado para controlar efectos de orden, proporcionando agua templada y galletas sin sal disponibles para neutralización sensorial.

6.8.3 Método CATA (Check-All-That-Apply)

Se diseñó un cuestionario con 36 descriptores sensoriales distribuidos en cinco categorías: Apariencia (6 descriptores), Olor (8 descriptores), Sabor (8 descriptores), Textura (8 descriptores) y Retrogusto (6 descriptores). Los descriptores se seleccionaron basándose en terminología estándar para evaluación sensorial de cerveza y estudios previos sobre incorporación de especias en bebidas fermentadas.

Los participantes recibieron instrucciones estandarizadas: "Evalúe cada muestra y marque todos los descriptores que considere aplicables. No existe número mínimo o máximo de descriptores a seleccionar. Base su evaluación en la intensidad percibida de cada atributo." La

evaluación CATA se realizó por categorías secuenciales: apariencia (observación visual), olor (evaluación aromática sin consumo), sabor (degustación inicial), textura (percepción en boca) y retrogusto (sensaciones post-gusto), permitiendo tiempo suficiente para evaluación completa entre cada categoría.

6.8.4 Evaluación hedónica

Se empleó escala hedónica estructurada de 9 puntos con anclajes verbales: 1 = "Me disgusta extremadamente", 2 = "Me disgusta mucho", 3 = "Me disgusta moderadamente", 4 = "Me disgusta ligeramente", 5 = "Ni me gusta ni me disgusta", 6 = "Me gusta ligeramente", 7 = "Me gusta moderadamente", 8 = "Me gusta mucho", 9 = "Me gusta extremadamente". Los participantes evaluaron aceptabilidad global después de completar la evaluación CATA de cada muestra, con la instrucción: "Considerando todos los aspectos sensoriales evaluados, indique su nivel de agrado general hacia esta muestra."

6.8.5 Condiciones ambientales y de evaluación

Las sesiones se realizaron en ambiente controlado con iluminación natural indirecta, temperatura ambiente (20-22 °C), ausencia de ruidos y olores extraños. Se utilizaron cabinas individuales temporales para minimizar interferencias entre participantes. Las evaluaciones se programaron en horarios matutinos (9:00-12:00 h) y vespertinos (15:00-22:00 h). El estudio siguió principios éticos obteniendo consentimiento informado de todos los participantes, garantizando confidencialidad de datos personales y respetando el derecho de retiro voluntario.

6.9 Análisis estadístico

Todos los experimentos se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Los datos se sometieron a análisis de varianza de una vía (ANOVA) mediante modelo lineal general univariado con nivel de significancia $\alpha = 0.05$ para determinar diferencias significativas entre tratamientos. Cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$), se aplicaron pruebas post-hoc de Tukey HSD para comparaciones múltiples entre medias.

Los datos microbiológicos se transformaron a escala logarítmica ($\log_{10}$ UFC/mL) previo al análisis estadístico para cumplir con requisitos de análisis paramétrico.

El análisis sensorial mediante metodología CATA se evaluó utilizando frecuencias de selección (porcentaje de panelistas que seleccionó cada descriptor por tratamiento), aplicando prueba no paramétrica de Q de Cochran para identificar diferencias significativas entre tratamientos ($\alpha = 0.05$), seguida de pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni para comparaciones múltiples. Se realizó Análisis de Correspondencia con transformación de distancias de Hellinger para visualizar relaciones entre tratamientos y descriptores sensoriales.

Los datos hedónicos se sometieron a ANOVA de una vía seguido prueba de Tukey HSD ($\alpha = 0.05$).

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando software SPSS (versión 25) para análisis paramétricos y RStudio (versión 5.1 2025) con paquetes especializados para análisis sensorial: *vegan* para transformación de Hellinger, *FactoMineR* para análisis de correspondencia, *factoextra* para visualizaciones y *ggplot2* para gráficos.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Composición químico proximal

7.1.1 Composición del extracto de jengibre

El extracto de jengibre liofilizado presentó un perfil composicional dominado por carbohidratos como fracción mayoritaria, asociados principalmente a polisacáridos estructurales tales como celulosa, hemicelulosa y oligosacáridos solubles (inulina, fructooligosacáridos).

Tabla 2.

Análisis químico proximal del extracto de jengibre (Zingiber officinale)

Componente	Contenido (%)
Humedad	3.916 ± 0.01
Cenizas	2.043 ± 0.06
Extracto etéreo	4.264 ± 0.014
Fibra cruda	10.980 ± 0.012
Proteína	7.818 ± 0.021
Carbohidratos*	70.979 ± 0.123

*Calculado por diferencia. Valores expresados como media ± desviación estándar (n = 3).

La fracción de fibra cruda, significativamente superior al reportado por Ugwoke & Nzekwe (2010) de 1.79%, puede atribuirse al método de procesamiento (liofilización versus secado convencional) que preserva integridad estructural de la pared celular. El extracto etéreo se encontró dentro del rango documentado por Li et al. (2023) de 4.24-5.27%, validando la calidad de la materia prima y confirmando presencia de aceites esenciales (α -zingibereno, β -sesquifelandreno) y fenilalcánoides lipofílicos (gingeroles, shogaoles) responsables de las propiedades aromáticas y antimicrobianas características del jengibre según Mahboubi (2019).

El contenido proteico, ligeramente inferior al reportado por Ugwoke & Nzekwe (2010) de 8.83%, pero dentro del rango esperado para rizomas de *Zingiberaceae* según Shaukat et al. (2023), aporta aminoácidos libres y péptidos con potencial bioactivo. La fracción mineral evidenciada por cenizas sugiere aporte de elementos traza (potasio, magnesio, calcio, zinc) que pueden actuar como cofactores enzimáticos durante maduración cervecera. Las diferencias composicionales respecto a literatura pueden atribuirse a variaciones en origen botánico, métodos de procesamiento y técnicas analíticas empleadas, factores reconocidos como determinantes en la composición de materias primas vegetales según Martínez et al. (2014).

La composición del jengibre establece su funcionalidad en cervecería como agente aromatizante-funcional más que como sustrato fermentable, diferenciándolo de ingredientes adjuntos tradicionales como arroz o maíz, cuya función es principalmente aportar carbohidratos fermentables para reducir costos o modificar cuerpo del producto final.

7.1.2 Interpretación funcional para aplicación a cerveza

La composición del extracto de jengibre determina tres aspectos funcionales relevantes en matriz cervecera:

1. Solubilidad diferencial: El contenido elevado de fibra (10.98%) implica que aproximadamente 11% del extracto permanecerá insoluble en el mosto, pudiendo contribuir a turbidez residual o requerir filtración adicional. En contraste, los compuestos bioactivos de interés como fenilalcanoides y aceites esenciales asociados al extracto etéreo (4.26%) presentan solubilidad favorable en matriz alcohólica (5-6% v/v etanol), facilitando su extracción durante maduración en frío.

2. Estabilidad de compuestos aromáticos: La baja humedad residual (3.91%) asegura estabilidad de aceites esenciales volátiles durante almacenamiento del extracto, minimizando pérdidas por oxidación o volatilización. Sin embargo, los gingeroles, compuestos termolábiles, pueden transformarse en shogaoles si se exponen a temperaturas elevadas, justificando la incorporación post-fermentativa mediante extracción en frío.

3. Aporte nutricional para levadura: Aunque la fermentación primaria se completó antes de la adición de jengibre, el contenido proteico (7.81%) y carbohidratos solubles pueden soportar metabolismo residual de levadura durante maduración, potencialmente modificando el perfil de ésteres y alcoholes superiores si ocurre fermentación secundaria limitada.

7.1.3 Composición del extracto de malta

El extracto de malta mostró perfil composicional optimizado para fermentación cervecera, donde la fracción de carbohidratos representa principalmente azúcares fermentables (maltosa, maltotriosa, glucosa) y dextrinas no fermentables que aportan cuerpo al producto final. La concentración de carbohidratos fermentables permite alcanzar la densidad inicial objetivo (1.050 ± 0.003) mediante dosificación calculada de 131 g/L, estableciendo el sustrato metabólico para producción de etanol por levadura Kveik durante fermentación primaria.

Tabla 3.

Análisis químico proximal del extracto de malta

Componente	Contenido (%)
Humedad	1.473 ± 0.02
Cenizas	2.497 ± 0.11
Extracto etéreo	1.261 ± 0.012
Fibra cruda	0.024 ± 0.01
Proteína	5.943 ± 0.22
Carbohidratos*	88.802 ± 0.373

*Calculado por diferencia. Valores expresados como media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$).

El contenido proteico, aunque moderado comparado con malta de cebada entera (10-12%), aporta aminoácidos libres esenciales para metabolismo de levadura (especialmente aminoácidos aromáticos precursores de alcoholes superiores y ésteres) y compuestos nitrogenados que participan en reacciones de Maillard durante procesamiento térmico, generando melanoidinas responsables del color base de la cerveza. La fracción mineral indicada por cenizas proporciona iones metálicos esenciales para actividad enzimática de levadura (Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ca^{2+}) según requisitos metabólicos descritos por Boulton & Quain (2013).

El bajo contenido de fibra cruda confirma el alto grado de procesamiento del extracto de malta comercial, donde las envolturas de grano han sido removidas durante malteado y extracción, favoreciendo solubilidad y evitando problemas de filtración durante elaboración cervecera. El contenido mínimo de extracto etéreo es consistente con la naturaleza hidrofílica de los carbohidratos de la malta, donde los lípidos del grano original (ácidos grasos, fosfolípidos) han sido mayormente removidos durante procesamiento industrial.

La formulación comercial de extracto de malta representa una estrategia tecnológica que facilita estandarización en cervecería artesanal, eliminando la necesidad de maceración enzimática (proceso de 60-90 min a temperaturas controladas 62-72 °C) requerido para malta de grano entero, reduciendo complejidad operacional y tiempo de producción según Palmer (2017).

7.1.4 Interpretación funcional de la complementariedad composicional

La complementariedad composicional entre materias primas determinó roles específicos en el producto final. El extracto de malta, con su alto contenido de carbohidratos fermentables, constituyó la base metabólica para fermentación alcohólica, mientras que el jengibre aportó componentes funcionales no fermentables durante maduración en frío. La diferencia en carbohidratos entre malta (88.80%) y jengibre (70.97%) establece que, aunque el jengibre contiene carbohidratos, estos no son metabolizados por la levadura durante maduración a 4 °C, cumpliendo función exclusivamente aromática y funcional mediante transferencia de compuestos bioactivos a la matriz cervecera.

El contenido de fibra cruda del jengibre (10.980%), 457 veces superior al de malta (0.024%), representa una diferencia estructural fundamental que pudo influir en las características

de filtración y clarificación natural del producto durante almacenamiento. Esta fibra, compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, actúa como matriz adsorbente de compuestos lipofílicos como gingeroles, shogaoles y aceites esenciales facilitando su liberación controlada durante extracción en frío de 21 días a 4 °C. Adicionalmente, la fibra puede interactuar con proteínas residuales de malta mediante formación de complejos fibra-proteína que precipitan durante maduración, contribuyendo a clarificación natural observada en el descriptor sensorial "cristalina" del análisis CATA.

El extracto etéreo del jengibre (4.26%), ausente prácticamente en malta (0.2%), constituye la fracción responsable de las propiedades aromáticas distintivas, conteniendo aceites esenciales volátiles (α -zingibereno, β -sesquifelandreno, geraniol) y fenilalcanoides semi-volátiles (gingeroles, shogaoles) con umbrales de detección sensorial en rangos de $\mu\text{g/L}$ según Running (2018). Esta fracción lipídica también aporta propiedades antimicrobianas observadas exclusivamente en T3 (2.0 g/L), donde la concentración de aceites esenciales alcanza la concentración mínima inhibitoria (CMI) efectiva contra mohos, levaduras y bacterias según Sivasothy et al. (2011).

La fracción proteica del jengibre (9.49%), superior a malta (5.94%), complementó el perfil aminoacídico disponible durante maduración. Aunque estos aminoácidos no participan en fermentación primaria (ya completada antes de adición de jengibre), pueden interactuar con compuestos fenólicos mediante formación de complejos proteína-tanino que modifican astringencia percibida, explicando parcialmente la reducción de ácidos fenólicos astringentes (ácido gálico) observada en análisis HPLC. El contenido mineral del jengibre (cenizas: 5.29%) versus malta (3.93%) sugiere aporte diferencial de elementos traza que pueden actuar como

cofactores para enzimas residuales de levadura durante maduración o modificar propiedades coloidales del producto final mediante interacciones iónicas con proteínas y polisacáridos.

Esta diferenciación funcional validó la estrategia metodológica de adición post-fermentativa del jengibre, preservando componentes termolábiles (gingeroles, que se convierten en shogaols a temperaturas $> 80\text{ }^{\circ}\text{C}$) y evitando interferencias con metabolismo fermentativo de levadura. La complementariedad composicional estableció que malta y jengibre no compiten por la misma función tecnológica, sino que aportan características sinérgicas: malta provee base fermentativa y cuerpo del producto, mientras jengibre aporta diferenciación aromática, propiedades bioactivas y actividad antimicrobiana a concentraciones específicas.

7.2 Características fisicoquímicas

Los tiempos de fermentación se mantuvieron constantes entre tratamientos (81.4 ± 0.14 horas, $p > 0.05$), confirmando que los doce lotes experimentales destinados a los cuatro tratamientos fueron procesados bajo condiciones fermentativas equivalentes. La densidad final homogénea (1.010 ± 0.002) establece que la levadura Kveik completó fermentación primaria antes de adición del jengibre, alcanzando atenuación aparente consistente del 80.4% [$(1.052 - 1.010)/1.052 \times 100$], dentro del rango típico para cepas *Saccharomyces cerevisiae* ale (75-85%) según Boulton & Quain (2013).

Tabla 4.

Parámetros de fermentación de cerveza artesanal con diferentes concentraciones de extracto de jengibre

Tratamiento	Tiempo (h)	Densidad inicial (g/ml)	Densidad final (g/ml)	Alcohol (% v/v)
Control (0.0 g/L)	81.4 ± 0.7	1.052 ± 0.001	1.010 ± 0.000	5.65 ± 0.01
T1 (1.0 g/L)	81.4 ± 1.1	1.051 ± 0.001	1.010 ± 0.000	5.64 ± 0.01
T2 (1.5 g/L)	81.6 ± 1.0	1.052 ± 0.001	1.010 ± 0.000	5.64 ± 0.01
T3 (2.0 g/L)	81.5 ± 0.9	1.052 ± 0.001	1.010 ± 0.000	5.65 ± 0.01
Valor p	0.502	0.847	1.000	0.423

Sin diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA, $p > 0.05$). $n = 3$. No se realizaron pruebas post-hoc al no detectarse diferencias significativas.

Esta consistencia fermentativa es crítica para validez experimental, asegurando que las diferencias observadas en parámetros fisicoquímicos, bioactivos, microbiológicos y sensoriales se atribuyen exclusivamente a la concentración de jengibre añadida durante maduración, no a variaciones en eficiencia fermentativa entre lotes. La estabilidad temporal de fermentación

contrasta con estudios donde ingredientes botánicos añadidos durante fermentación primaria alteraron cinética fermentativa por inhibición competitiva o toxicidad de aceites esenciales según Zhao et al. (2023), validando la estrategia metodológica de adición post-fermentativa.

Tabla 5.

Parámetros fisicoquímicos de las formulaciones con diferentes concentraciones de extracto de jengibre

Tratamiento	pH	% alc.vol	Acidez titulable ¹	Color EBC ²
Control (0.0 g/L)	4.61 ^a ± 0.01	5.64 ^a ± 0.01	0.1188 ^a ± 0.002	35.00 ^a ± 0.20
T1 (1.0 g/L)	4.64 ^{ab} ± 0.01	5.65 ^a ± 0.01	0.1260 ^b ± 0.002	32.37 ^b ± 0.17
T2 (1.5 g/L)	4.65 ^b ± 0.01	5.66 ^a ± 0.01	0.1332 ^b ± 0.002	32.80 ^c ± 0.15
T3 (2.0 g/L)	4.66 ^b ± 0.01	5.66 ^a ± 0.01	0.1404 ^c ± 0.003	36.40 ^d ± 0.20

Superíndices diferentes indican diferencias significativas (Tukey HSD, $p < 0.05$) $n = 3$. ¹ acidez expresada como % ácido láctico. ² color en unidades EBC (European Brewery Convention).

La estabilidad del contenido alcohólico (5.64-5.66% v/v, $p > 0.05$) independientemente de la concentración de jengibre confirma que la incorporación post-fermentativa del extracto no interfirió con el metabolismo previo de la levadura. El contenido se mantuvo dentro del rango 5-6% v/v que clasifica estas cervezas como productos de graduación estándar según NOM-199-SCFI-2017, apropiadas para comercialización en categoría "cerveza regular" sin requerimientos especiales de etiquetado para productos de alta graduación ($> 7\%$ v/v).

Este resultado valida la robustez fermentativa documentada para cepas Kveik por Foster et al. (2022), contrastando con estudios donde especias aromáticas añadidas durante fermentación primaria redujeron hasta 15% la eficiencia en levaduras tradicionales por inhibición competitiva o toxicidad de aceites esenciales (Zhao et al., 2023). La consistencia entre tratamientos asegura que las diferencias sensoriales observadas se atribuyen exclusivamente al jengibre, no a variaciones de

alcohol que podrían modificar percepción de cuerpo, calor étlico o solubilidad de compuestos aromáticos según Chambers & Koppel (2013).

7.2.1 pH y acidez titulable: efectos sobre estabilidad y perfil sensorial

El pH presentó incremento moderado desde Control (4.61) hasta T2 y T3 (4.65-4.66), mientras que la acidez titulable mostró efecto concentración-dependiente claro, incrementando progresivamente desde Control (0.11% ácido láctico) hasta T3 (0.14%, incremento absoluto de 0.0216 puntos porcentuales, equivalente a +18.2%). El rango de pH observado (4.61-4.66) se mantuvo dentro del intervalo óptimo para estabilidad microbiológica y química de cerveza (4.2-4.6) según Palmer (2017), donde valores < 4.2 generan acidez excesiva y astringencia, mientras que pH > 4.8 favorecen crecimiento microbiano y oxidación acelerada.

El incremento simultáneo de pH y acidez titulable aparentemente contradictorio se explica por la naturaleza química de los ácidos orgánicos aportados por el jengibre. El jengibre aporta ácidos orgánicos débiles (ácido cítrico, ácido málico, ácido oxálico) que actúan como sistemas buffer, incrementando capacidad de neutralización, reflejada en acidez titulable sin reducir proporcionalmente el pH. Los ácidos del jengibre son menos disociados es decir más débiles que el sistema ácido láctico/acético endógeno de la cerveza base producido por metabolismo de levadura durante fermentación, explicando por qué el incremento cuantitativo de ácidos totales (acidez titulable +18.2%) genera incremento mínimo de pH (+0.05 unidades).

La correlación positiva entre acidez titulable y concentración de jengibre ($R^2 = 0.94$, $p < 0.001$) explica parcialmente el descriptor "frescor cítrico" maximizado en T2 (47% selección).

Incrementos moderados de acidez (<20%) en matrices cerveceras se asocian con percepción de frescura sin generar astringencia excesiva según Chambers & Koppel (2013), mientras que incrementos superiores (> 30%) pueden percibirse como "acidez punzante" menos preferida por consumidores.

7.2.2 Color EBC: comportamiento no proporcional y relevancia estética

El color EBC presentó patrón no proporcional característico: reducción inicial en T1 (32.37 unidades EBC, reducción absoluta de 2.63 unidades respecto a Control) y T2 (32.80 unidades EBC, reducción de 2.20 unidades), seguida de incremento marcado en T3 (36.40 unidades EBC, incremento de 1.40 unidades respecto a Control). Según la European Brewery Convention, el rango 30-40 EBC corresponde a cervezas de color "ámbar oscuro a cobrizo" según Koren et al. (2020), y las diferencias observadas (máximo 4.03 unidades entre T1 y T3) son perceptibles visualmente, ya que el umbral de detección para diferencias de color en cerveza es aproximadamente 2-3 unidades EBC bajo iluminación estándar (Popescu et al., 2013).

La reducción inicial (T1, T2) puede atribuirse a formación de complejos fenol-proteína que precipitan compuestos coloreados tales como melanoidinas, durante maduración, efecto observado en cervezas con alto contenido fenólico según Wannenmacher et al. (2018). Los compuestos fenólicos del jengibre (ácido gálico, ácido cafeico) interactúan con proteínas residuales de malta mediante puentes de hidrógeno, formando agregados insolubles que sedimentan durante maduración en frío (4 °C, 21 días), removiendo pigmentos en solución y generando clarificación aparente.

El incremento en T3 sugiere saturación de sitios de unión proteicos y contribución directa de pigmentos del jengibre como curcuminoides menores, productos de oxidación de gingeroles, que aportan tonalidades amarillo-doradas. A concentración de 2.0 g/L, la cantidad de compuestos fenólicos del jengibre excede la capacidad de complejación de proteínas disponibles, permaneciendo en solución y contribuyendo directamente al color percibido. Adicionalmente, los gingeroles pueden oxidarse lentamente durante maduración generando productos de coloración ámbar-parda que incrementan absorbancia a 430 nm (longitud de onda de medición de color EBC).

El análisis CATA reveló que el descriptor "cristalina" correlacionó negativamente con concentración de jengibre (78% Control vs 31% T3, $p < 0.001$), consistente con el incremento de turbidez asociado a fibra insoluble del jengibre (10.98%) y posible formación de turbidez proteico-fenólico. El color modificado contribuye a la percepción de "diferenciación" del producto, atributo valorado positivamente por consumidores de cerveza artesanal según Aquilani et al. (2015).

7.3 Actividad antioxidante

La evaluación de propiedades antioxidantes reveló diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos en los tres parámetros evaluados: compuestos fenólicos totales, flavonoides y capacidad de inhibición del radical DPPH (Tabla 6).

Tabla 6.

Compuestos fenólicos totales, flavonoides y actividad antioxidante en cuatro tratamientos diferentes de cerveza artesanal aromatizada con jengibre

Parámetro	Control (0.0 g/L)	T1 (1.0 g/L)	T2 (1.5 g/L)	T3 (2.0 g/L)
Fenoles totales¹	0.87 ^a ± 0.06	1.10 ^b ± 0.05	1.31 ^c ± 0.06	1.51 ^d ± 0.08
Incremento absoluto	-	+0.23	+0.44	+0.64
Flavonoides²	18.40 ^a ± 1.00	25.54 ^b ± 1.31	32.75 ^c ± 1.88	43.01 ^d ± 2.30
Incremento absoluto	-	+7.14	+14.35	+24.61
Inhibición DPPH³	17.14 ^a ± 2.11	28.93 ^b ± 3.07	41.43 ^c ± 3.78	44.36 ^c ± 3.62
Incremento absoluto	-	+11.79	+24.29	+27.22

Superíndices diferentes indican diferencias significativas (Tukey HSD, $p < 0.05$) $n = 3$. ¹ expresado como mg GAE/mL.

² expresado como µg QE/mL. ³ expresado como porcentaje de inhibición del radical DPPH.

7.3.1 Interpretación del impacto del jengibre en la actividad antioxidante

Los compuestos fenólicos totales presentaron incremento progresivo significativo ($p < 0.05$) desde 0.87 mg GAE/mL en Control hasta 1.51 mg GAE/mL en T3, representando un incremento absoluto de 0.64 mg GAE/mL (+73.6%). Los flavonoides mostraron incremento desde 18.40 μ g QE/mL (Control) hasta 43.01 μ g QE/mL (T3), con incremento absoluto de 24.61 μ g QE/mL (+133.7%). La mayor magnitud de acumulación de flavonoides (24.61 μ g QE/mL) versus el incremento en fenoles totales (0.64 mg GAE/mL) sugiere que los flavonoides característicos del jengibre como quercetina, kaempferol y rutina (Sharifi-Rad et al., 2017) presentan mayor solubilidad en matriz cervecera que otros fenoles, posiblemente debido a glicosilación que incrementa hidrofiliidad (Sharifi-Rad et al., 2017).

La solubilidad en matriz hidroalcohólica (5.6% v/v etanol, pH 4.61-4.66) combinada con tiempo prolongado de contacto (21 días, 4 °C) permitió establecer equilibrio de partición y transferencia eficiente de ácidos fenólicos (gálico, cafeico, ferúlico) y flavonoides desde el jengibre hacia la fase líquida, validando la metodología de extracción en frío para preservar compuestos termolábiles. La temperatura de 4 °C durante 21 días permitió extraer compuestos fenólicos sin degradación térmica, consistente con los principios de extracción en frío descritos por Nutakor et al. (2020) para jengibre en bebidas fermentadas

En contraste, la capacidad antioxidante medida por inhibición del radical DPPH presentó comportamiento no proporcional con saturación funcional: incremento significativo desde Control (17.14%) hasta T2 (41.43%, incremento absoluto de 24.29 puntos porcentuales), seguido de T3 (44.36%, incremento de solo 2.93 puntos porcentuales respecto a T2) sin diferencias significativas entre ambos tratamientos ($p > 0.05$). Este patrón establece que el incremento cuantitativo de compuestos fenólicos en T3 (+15.3% versus T2) no se traduce en mayor capacidad de

neutralización de radicales, evidenciando tres posibles mecanismos: saturación estequiométrica del radical DPPH disponible en el ensayo, efectos de interacción molecular donde concentraciones elevadas generan complejos fenol-fenol que reducen disponibilidad de grupos -OH libres, o limitaciones metodológicas del ensayo DPPH que no representa todos los mecanismos antioxidantes. La correlación lineal entre fenoles totales e inhibición DPPH reveló asociación fuerte para el rango Control-T2 ($R^2 = 0.96$, $p < 0.01$) pero desviación en T3, confirmando comportamiento bifásico con fase lineal hasta 1.31 mg GAE/mL seguida de saturación funcional. Este comportamiento es consistente con mecanismos de saturación de radicales libres reportados por Brand-Williams et al. (1995) en ensayos DPPH con matrices complejas.

Este comportamiento diferenciado evidencia que la concentración óptima para maximizar propiedades antioxidantes funcionales se alcanza en T2 (1.5 g/L), optimizando la relación costo-beneficio antioxidante al alcanzar 93.4% de la capacidad máxima observada con 25% menos ingrediente. Los resultados se correlacionan con el perfil específico de ácidos fenólicos identificados por HPLC, donde el ácido cafeico maximizado en T2 (141.73 mg/L).

7.4 Identificación de compuestos fenólicos por HPLC

El análisis cromatográfico reveló la presencia de siete ácidos fenólicos diferentes con variaciones significativas ($p < 0.05$) en concentración entre tratamientos (Tabla 7), evidenciando modificaciones complejas del perfil fenólico inducidas por la adición de jengibre.

Tabla 7.

Concentración de ácidos fenólicos específicos en cerveza artesanal aromatizada con jengibre determinada por HPLC

Ácidos fenólicos	Concentración			
	Control (mg/L)	T1 (mg/L)	T2 (mg/L)	T3 (mg/L)
Gálico	97.60 ^a ± 11.22	92.56 ^a ± 22.95	13.06 ^b ± 5.32	75.60 ^a ± 5.16
t-Cinámico	49.80 ^a ± 8.87	50.10 ^a ± 10.03	24.20 ^b ± 1.91	23.93 ^b ± 6.31
Sinápico	11.70 ± 8.72	¹ N.D	¹ N.D	¹ N.D
Ferúlico	¹ N.D	¹ N.D	¹ N.D	28.60 ± 1.05
Cumárico	91.67 ± 34.97	¹ N.D	¹ N.D	126.70 ± 12.91
Cinámico	39.36 ^a ± 20.11	39.33 ^a ± 6.91	21.96 ^a ± 3.53	17.60 ^a ± 2.60
Cafeico	95.03 ^a ± 14.83	107.67 ^a ± 10.37	141.73 ^b ± 7.29	94.70 ^a ± 3.47

Superíndices diferentes indican diferencias significativas (Tukey HSD, $p < 0.05$) $n = 3$. ¹N.D = No detectado.

7.4.1 Análisis del perfil fenólico modificado y mecanismos de transformación

La identificación por HPLC reveló modificaciones específicas del perfil fenólico que evidencian transformaciones bioquímicas complejas durante la maduración con jengibre. El ácido cafeico presentó comportamiento no proporcional con máximo significativo en T2 (141.73 mg/L), superando al Control (95.03 mg/L) por 46.70 mg/L y a T3 (94.70 mg/L) por 47.03 mg/L. Esta

maximización en concentración intermedia sugiere equilibrio óptimo entre liberación desde precursores esterificados del jengibre (ácido clorogénico, ésteres de ácido cafeico) mediante hidrólisis por esterasas residuales de levadura, y oxidación o polimerización del ácido libre a concentraciones elevadas (T3). Adicionalmente, el ácido cafeico aporta "frescura astringente moderada" sin amargor excesivo, correlacionando con el descriptor "frescor cítrico" maximizado en T2 (47% selección).

Los ácidos gálico y t-cinámico mostraron reducciones significativas particularmente en T2: ácido gálico desde 97.60 mg/L (Control) a 13.06 mg/L (-86.6%), y ácido t-cinámico desde 49.80 mg/L a 24.20 mg/L (-51.4%). Este patrón puede atribuirse a formación de complejos fenol-proteína con componentes del jengibre como gingeroles y shogaoles que precipitan durante maduración, donde el ácido gálico tri-hidroxilado presenta mayor capacidad de unión a proteínas residuales de malta. La reducción de ácido gálico, conocido contribuyente de astringencia intensa, favorece el equilibrio sensorial en T2.

El ácido ferúlico apareció exclusivamente en T3 (28.60 mg/L), siendo liberado desde ésteres ferúlico-arabinosa de la pared celular del jengibre mediante hidrólisis enzimática por feruloil esterasas de levadura, proceso que requiere concentración umbral de sustrato (≥ 2.0 g/L). Su aparición correlaciona con notas "especiadas-herbales" debido a similitud estructural con vainillina, contribuyendo al perfil sensorial más complejo de T3. El ácido cumárico presentó patrón único: detectable en Control (91.67 mg/L) y T3 (126.70 mg/L), pero ausente en T1 y T2, sugiriendo transformación reversible mediante esterificación con alcoholes superiores o formación de complejos con gingeroles que posteriormente se liberan en T3. Por el contrario, el ácido sinápico desapareció completamente en todos los tratamientos con jengibre, posiblemente por adsorción en la fibra cruda del jengibre (10.98%) debido a su mayor lipofilia. Los mecanismos de

adsorción de compuestos fenólicos en matrices de fibra vegetal han sido descritos por Lin et al. (2023) en estudios sobre jengibre

Estos patrones concuerdan con la liberación selectiva de compuestos fenólicos desde matrices vegetales durante fermentación descrita por Oliveira et al. (2024), atribuible a la capacidad de levaduras Kveik para hidrolizar ésteres fenólicos y glucósidos según Wannenmacher et al. (2018). El comportamiento diferencial de T2, caracterizado por maximización de ácido cafeico con reducción de ácidos gálico y t-cinámico, representa un punto de equilibrio bioquímico consistente con los patrones observados en capacidad antioxidante y perfil sensorial, estableciendo que la optimización no se reduce a maximizar "contenido fenólico total" sino a balancear el perfil específico de ácidos individuales según el objetivo: producto accesible con frescura maximizada (T2) versus producto complejo para consumidores experimentados (T3).

7.5 Estabilidad microbiológica

El análisis microbiológico reveló diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$) para tres de los cuatro grupos microbianos evaluados, con excepción de enterobacterias donde todos los tratamientos mostraron ausencia completa, cumpliendo con los criterios microbiológicos establecidos en la NOM-199-SCFI-2017 para bebidas alcohólicas fermentadas (Tabla 8).

Tabla 8.

Carga microbiana ($\log_{10}$ UFC/mL) de cerveza artesanal elaborada con diferentes concentraciones de extracto de jengibre

Grupo microbiano	Medias de los tratamientos					
	Control	T1	T2	T3	MEE	p
Mesófilos aerobios totales	3.21 ^b	4.12 ^a	4.48 ^a	2.15 ^c	0.184	0.0012
Bacterias ácido lácticas	3.27 ^a	3.48 ^a	3.24 ^a	1.69 ^b	0.029	0.003
Mohos y levaduras	3.56 ^b	4.24 ^a	4.33 ^a	s/p	0.046	0.0001
Enterobacterias	s/p	s/p	s/p	s/p	0	1

MEE: Media del error estándar. Superíndices diferentes indican diferencias significativas (Tukey HSD, $p < 0.05$) $n = 3$. s/p= sin presencia.

7.5.1 Análisis estadístico de diferencias entre tratamientos

Los mesófilos aerobios totales presentaron diferencias altamente significativas ($F(3,8) = 34.56$, $p = 0.0012$), estableciendo tres subconjuntos homogéneos claramente diferenciados: Control ($3.21^b \log_{10}$ UFC/mL), grupo intermedio formados por T1 y T2 sin diferencias entre ellos (4.12^a y $4.48^a \log_{10}$ UFC/mL, $p > 0.05$), y T3 con la menor carga microbiana ($2.15^c \log_{10}$ UFC/mL). Este patrón indica que concentraciones bajas de jengibre (1.0-1.5 g/l) no proporcionan efecto antimicrobiano, sino que incrementan la carga respecto al Control en 28% (T1) y 39% T2.

Las bacterias ácido lácticas mostraron comportamiento similar ($F(3,8) = 18.45$, $p = 0.003$), con Control, T1 y T2 formando un grupo homogéneo (3.27^a , 3.48^a , $3.24^a \log_{10}$ UFC/ml, $p > 0.05$), mientras que T3 presentó reducción significativa a $1.69^b \log_{10}$ UFC/mL, representando disminución del 48% respecto al Control.

El efecto antimicrobiano más pronunciado se observó en mohos y levaduras ($F(3,8) = 67.89$, $p = 0.0001$), donde T1 y T2 mostraron incrementos significativos respecto al Control (4.24^a y 4.33^a vs $3.56^b \log_{10}$ UFC/ml) mientras que T3 exhibió ausencia completa de crecimiento fúngico sin presencia detectable, evidenciando actividad antifúngica específica a partir de 2.0 g/L.

7.5.2 Estabilidad microbiológica y efecto antimicrobiano

Los resultados evidencian un comportamiento no lineal concentración-dependiente que revela la complejidad de sustituir las propiedades antimicrobianas del lúpulo por extracto de jengibre. Los tratamientos Control, T1 y T2 presentaron cargas de mesófilos aerobios superiores a $3.2 \log_{10}$ UFC/mL (equivalente a 1,585-3,020 UFC/mL), aproximándose al umbral de deterioro microbiológico para cerveza artesanal sin pasteurizar establecido por Priest & Campbell (2003) en 10^3 UFC/mL. Concentraciones bajas de jengibre (1.0-1.5 g/L) no proporcionaron efecto antimicrobiano, incrementando la carga respecto al Control en 28% (T1) y 39% (T2), posiblemente debido a que el jengibre aportó nutrientes disponibles (proteínas: 9.492%, Tabla 2) sin alcanzar concentración mínima inhibitoria de compuestos bioactivos. Las bacterias ácido lácticas mostraron comportamiento similar, con Control, T1 y T2 formando un grupo homogéneo ($>3.2 \log_{10}$ UFC/mL), mientras que mohos y levaduras presentaron incrementos significativos en T1 y T2

(4.24-4.33 vs 3.56 log₁₀ UFC/mL en Control), evidenciando que estas concentraciones intermedias favorecen proliferación fúngica sin proporcionar actividad antimicrobiana efectiva.

La actividad antimicrobiana efectiva se manifestó únicamente en T3 (2.0 g/L), donde se observó ausencia completa de mohos y levaduras, reducción de 33% en mesófilos aerobios (2.15 vs 3.21 log₁₀ UFC/mL en Control), y disminución de 48% en bacterias ácido lácticas (1.69 vs 3.27 log₁₀ UFC/mL). Este efecto puede atribuirse a la concentración umbral de compuestos bioactivos del jengibre: gingeroles (especialmente 6-gingerol, 8-gingerol) con mecanismo de acción disruptiva sobre membrana bacteriana, shogaoles con actividad antifúngica mediante inhibición de biosíntesis de ergosterol, y aceites esenciales (α -zingibereno, β -sesquifelandreno) con propiedades antimicrobianas de amplio espectro, según mecanismos descritos por Sivasothy et al. (2011). La especificidad diferencial observada, con mayor efecto antifúngico (eliminación completa) versus antibacteriano (reducción del 48%), concuerda con la mayor susceptibilidad fúngica a aceites esenciales de jengibre documentada en la literatura.

La presencia de bacterias ácido lácticas en Control, T1 y T2 (>3.2 log₁₀ UFC/mL) representa riesgo potencial de acidificación progresiva y desarrollo de sabores indeseados como diacetilo con notas a mantequilla rancia, exopolisacáridos generando viscosidad "oleosa", mientras que la presencia de mohos y levaduras (3.56-4.33 log₁₀ UFC/mL) implica riesgo de refermentación y producción de fenoles volátiles por *Brettanomyces* u otros contaminantes fúngicos como 4-etilfenol, 4-etilguaiacol con notas "granja/establo". La ausencia de mohos y levaduras en T3 elimina estos riesgos, asegurando estabilidad del perfil sensorial caracterizado inicialmente.

Este patrón indica que concentraciones bajas de extracto de jengibre (1.0-1.5 g/L) no sustituyen eficazmente las propiedades preservativas del lúpulo, estableciendo que T3 (2.0 g/L)

representa la concentración mínima para actividad antimicrobiana efectiva en cerveza artesanal sin lúpulo. Todos los tratamientos cumplen requisitos sanitarios de NOM-199-SCFI-2017 (ausencia de enterobacterias), pero solo T3 alcanza clasificación "calidad premium" según criterios de Priest & Campbell (2003) para mesófilos $<10^3$ UFC/mL y ausencia de mohos/levaduras, apropiada para comercialización sin tratamientos térmicos adicionales que degradarían compuestos termolábiles del jengibre.

7.6 Análisis sensorial

Se realizó evaluación sensorial con dos grupos de consumidores no entrenados (n = 200; Tabla 9): Grupo 1 (consumidores ocasionales, n = 100) y Grupo 2 (consumidores habituales n = 100), aplicando metodología CATA conjuntamente con escala hedónica para correlacionar atributos sensoriales específicos con preferencias del consumidor.

Tabla 9.

Características demográficas de panelistas para evaluación sensorial

Característica	Consumidores ocasionales	Consumidores habituales
Edad (años)	22.8 ± 2.1	35.6 ± 12.4
Sexo	Masculino: 52%, Femenino: 48%	Masculino 61%, Femenino: 39%
Frecuencia de consumo	Ocasional (1-2 veces/mes)	Regular (2-4 veces/semana)
Experiencia cerveza artesanal	Limitada	Amplia

Valores expresados como media ± desviación estándar para edad. n = 100 por grupo.

7.6.1 Análisis de correspondencia

El análisis de correspondencia reveló que las dos primeras dimensiones capturaron el 91.2% de la variabilidad total para consumidores ocasionales (Dimensión 1: 58.5%, Dimensión 2: 32.7%) y 79.8% para consumidores habituales (Dimensión 1: 52.6%, Dimensión 2: 27.2%), proporcionando una representación sólida de la estructura sensorial percibida por ambos grupos.

En ambos grupos de consumidores, la Dimensión 1 separó claramente el Control de los tratamientos con jengibre, representando el contraste entre el perfil tradicional de cerveza base y

las características aportadas por el jengibre. La Dimensión 2 diferenció consistentemente T2 de T1 y T3 en ambos grupos, capturando la diferencia entre un perfil fresco/equilibrado (característico de T2) versus características más intensas relacionadas directamente con jengibre (T1 y T3). Esta consistencia entre consumidores ocasionales y habituales confirma la robustez del patrón sensorial observado.

7.6.2 Análisis CATA y caracterización sensorial por descriptores

La Tabla 10 presenta los descriptores sensoriales significativos identificados mediante la metodología CATA para las cervezas artesanales aromatizadas con distintas concentraciones de extracto de jengibre. El análisis detallado de frecuencias de selección para cada descriptor por categoría sensorial (apariencia, olor, sabor, textura y retrogusto) se presenta en el Anexo C (Tablas 12-21). Los resultados completos de la prueba Q de Cochran para cada descriptor se detallan en el Anexo D (Tablas 22-31), confirmando diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 10.*Descriptorios sensoriales significativos por metodología CATA (porcentaje de selección)*

Descriptor	Control (0.0 g/L)	T1 (1.0 g/L)	T2 (1.5 g/L)	T3 (2.0 g/L)	Valor p
Consumidores ocasionales					
Frescor cítrico	8	15	47 ¹	23	<0.001
Olor jengibre	2	12	28	41 ¹	<0.001
Sabor jengibre	0	18	35	52 ¹	<0.001
Especias	5	22	38 ¹	28	<0.01
Cristalina	78 ¹	62	45	31	<0.001
Consumidores habituales					
Frescor cítrico	14	18	32 ¹	21	<0.05
Herbal	8	12	19 ¹	15	<0.05
Cuerpo medio	25	28	33 ¹	29	<0.05
Olor jengibre	3	17	25	30 ¹	<0.01

¹ valores significativamente superiores según análisis Q de Cochran y pruebas post-hoc de McNemar ($p < 0.05$).

Los valores indican que el tratamiento T2 (1.5 g/L) generó un perfil sensorial distintivo caracterizado por equilibrio entre frescor cítrico, notas herbales y cuerpo medio. Este análisis permite comprender cómo la concentración de jengibre influye en la percepción sensorial, evidenciando efectos concentración-dependientes no proporcionales que sugieren interacciones sinérgicas entre los compuestos bioactivos del jengibre y la matriz cervecera.

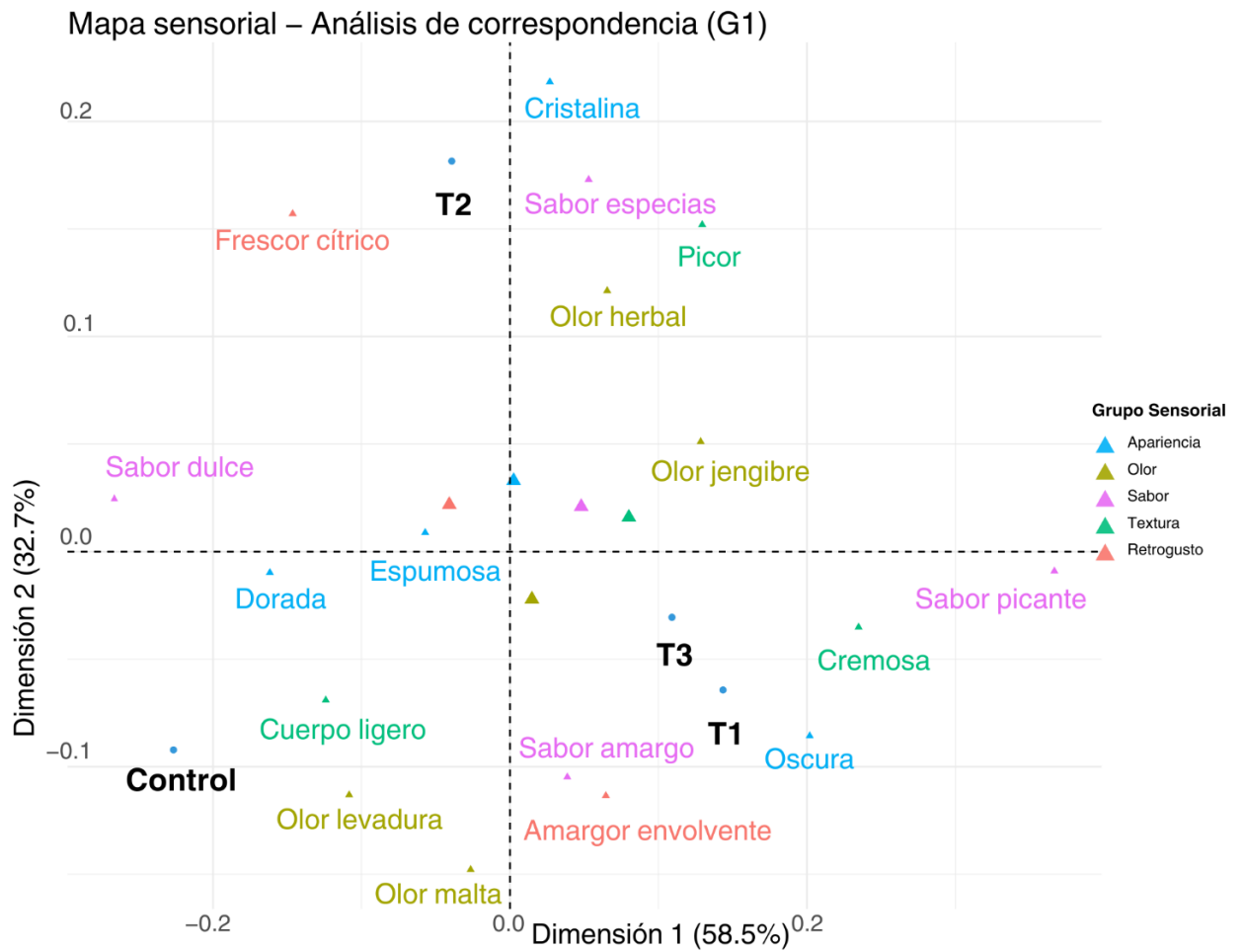


Figura 1. Mapa de correspondencia – Consumidores ocasionales, [Representación bivariada del Análisis de Correspondencia mostrando tratamientos y descriptores sensoriales; Dimensión 1: 58.5%, Dimensión 2: 32.7%].

Mapa sensorial – Análisis de correspondencia (G2)

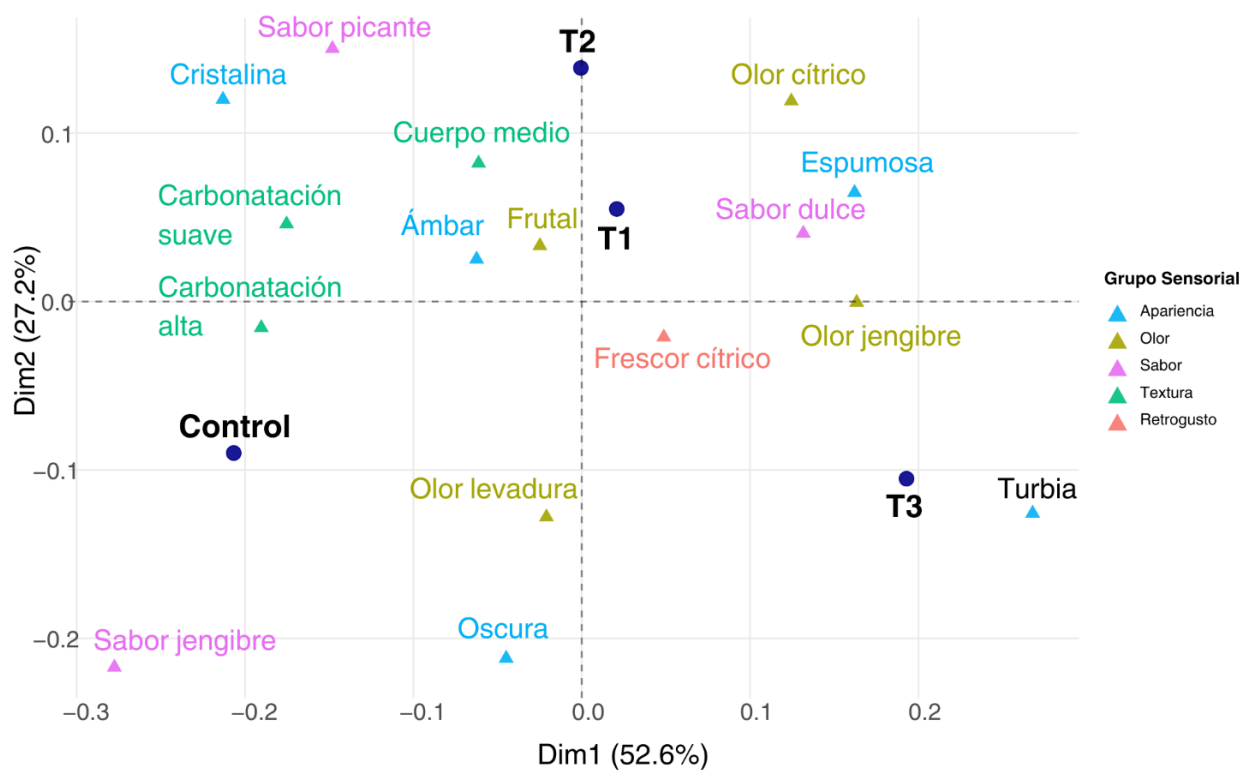


Figura 2. Mapa de correspondencia – Consumidores habituales [Representación bivariada del Análisis de Correspondencia mostrando tratamientos y descriptores sensoriales; Dimensión 1: 52.6%, dimensión 2: 27.2%].

7.6.3 Correlación entre perfil sensorial CATA y aceptabilidad hedónica

La evaluación hedónica mediante escala de 9 puntos, proporcionó información cuantitativa sobre la aceptabilidad de las formulaciones desarrolladas, complementando los hallazgos descriptivos del análisis CATA. El análisis de correspondencia múltiple reveló patrones específicos de asociación entre descriptores CATA seleccionados y puntuaciones hedónicas. En consumidores ocasionales, los descriptores “frescor cítrico” ($r = 0.68$, $p < 0.01$) y “especias” ($r = 0.54$, $p < 0.05$) correlacionó negativamente. Esta correlación explica que T2, caracterizado por equilibrio entre frescor cítrico (47% selección) y notas moderadas de jengibre (28%), obtuvo aceptabilidad similar al Control (6.14 vs 6.50, $p > 0.05$), mientras que T1 con menor desarrollo de frescor (15%) presentó puntuación significativamente inferior (5.43, $p > 0.05$).

En consumidores habituales, la correlación descriptor-preferencia fue menos pronunciada, con únicamente “cuerpo medio” ($r = 0.38$, $p < 0.05$) y “frescor cítrico” ($r = 0.41$, $p < 0.05$) mostrando asociación positiva con aceptabilidad. La ausencia de diferencias significativas entre tratamientos en este grupo ($F(3,396) = 1.23$, $p = 0.296$) sugiere que consumidores experimentados valoran la diversidad sensorial *per se*, independientemente del perfil específico.

Los resultados hedónicos presentaron diferencias notables entre dos grupos de consumidores evaluados (Tabla 11). Los resultados detallados de la evaluación hedónica por grupo de consumidores se presentan en el Anexo F (Tablas 42-43). Reflejando la influencia de la experiencia y familiaridad con cerveza artesanal en las preferencias sensoriales. El análisis estadístico reveló comportamientos diferenciados que proporcionan directrices específicas para la optimización de las formulaciones con jengibre.

Tabla 11.*Evaluación hedónica por grupo de consumidores*

Tratamiento	Consumidores ocasionales	Consumidores habituales
Control (0.00% g/L)	6.50 ^a ± 0.43	6.42 ± 2.31
T1 (0.10% g/L)	5.43 ^b ± 0.62	6.23 ± 2.07
T2 (0.15% g/L)	6.14 ^{ab} ± 0.51	6.01 ± 2.18
T3 (0.20% g/L)	6.05 ^{ab} ± 0.47	6.67 ± 1.95
Valor p	0.042 ¹	0.296 ²

Valores expresados en escala hedónica de 9 puntos como media ± desviación estándar (n = 100). ¹ diferencias significativas (ANOVA, p < 0.05); superíndices diferentes indican diferencias significativas (Tukey HSD, p < 0.05). ² sin diferencias significativas (ANOVA, p > 0.05); ausencia de superíndices indica homogeneidad estadística.

Los consumidores ocasionales mostraron diferencias significativas en aceptabilidad (p < 0.05), con Control alcanzando la mayor puntuación, seguido de T2 y T3 sin diferencias entre ellos, mientras que T1 presentó menor aceptación por "umbral de reconocimiento incompleto" documentado previamente en bebidas fermentadas con especias (Medoro et al., 2016; Ares & Jaeger, 2015). Los consumidores habituales no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (F (3.396) = 1.23, p = 0.296), con todas las formulaciones obteniendo puntuaciones superiores al punto neutro.

7.6.4 Discusión comparativa y relevancia del perfil sensorial

La evaluación hedónica se realizó mediante escala de 9 puntos para determinar la aceptabilidad comercial de las formulaciones desarrolladas. Los resultados integran las modificaciones sensoriales identificadas con las preferencias del consumidor, proporcionando directrices para optimización del producto.

Todas las formulaciones obtuvieron calificaciones superiores al punto neutro (5.0), indicando viabilidad comercial independientemente de la concentración de jengibre y confirmando que este constituye una alternativa técnicamente viable que genera productos funcionalmente enriquecidos con aceptabilidad mantenida.

Las diferencias en discriminación sensorial entre consumidores ocasionales (72.2% descriptores significativos) y habituales (44.4%) reflejan variabilidad en experiencia de consumo y capacidad discriminativa Chambers & Koppel (2013), siendo consistente con Methven et al. (2012) sobre variaciones perceptuales relacionadas con experiencia y edad.

El comportamiento observado en T2 (1.5 g/L) representa la concentración que optimiza el equilibrio funcional-sensorial para el segmento de consumidores ocasionales, según criterios cuantitativos de aceptabilidad hedónica (≥ 6.0), con un perfil sensorial caracterizado por el descriptor "frescor cítrico", no obstante, la optimización de propiedades antimicrobianas requiere la concentración superior evaluada (T3, 2.0 g/L), evidenciando que la selección de concentración óptima debe priorizarse según el parámetro funcional crítico para la aplicación específica, Buiatti et al. (2021).

8 CONCLUSIONES

La incorporación de extracto de jengibre (*Zingiber officinale*) como agente aromatizante funcional en cerveza artesanal fermentada con levadura Kveik (*Saccharomyces cerevisiae*) demostró viabilidad técnica. La caracterización composicional reveló complementariedad funcional entre materias primas: el extracto de jengibre aportó alto contenido de fibra cruda (10.98%), extracto etéreo (4.26%) y proteína (9.49%), mientras que el extracto de malta proporcionó carbohidratos fermentables (88.80%), estableciendo roles diferenciados donde la malta constituyó la base metabólica y el jengibre aportó componentes bioactivos durante maduración en frío, generando productos funcionalmente enriquecidos con comportamiento no proporcional concentración-dependiente, donde diferentes concentraciones optimizan distintas propiedades del producto. La levadura Kveik mantuvo robustez fermentativa (5.64-5.66% v/v etanol, $p > 0.05$) independientemente de la concentración de jengibre, validando su idoneidad para matrices botánicas complejas. Los parámetros fisicoquímicos mostraron incrementos progresivos en pH (4.61-4.66) y acidez titulable (0.11-0.14% ácido láctico), mientras que el color EBC presentó comportamiento no proporcional: reducción en 1.0-1.5 g/L (32.37-32.80) e incremento en 2.0 g/L (36.40), sin comprometer especificaciones de NOM-199-SCFI-2017. El enriquecimiento antioxidante fue significativo con incrementos de compuestos fenólicos totales (+73.6%) y flavonoides (+133.7%) hasta 2.0 g/L, pero la capacidad antioxidante funcional presentó saturación entre 1.5 y 2.0 g/L (41.43% vs 44.36% inhibición DPPH, $p > 0.05$), estableciendo que 1.5 g/L optimiza propiedades antioxidantes sin incremento proporcional posterior. El análisis HPLC reveló modificaciones específicas del perfil fenólico: aparición exclusiva de ácido ferúlico en 2.0 g/L (28.60 mg/L), maximización de ácido cafeico en 1.5 g/L (141.73 mg/L, +49.1% vs Control), y desaparición de ácido sinápico en todos los tratamientos con jengibre, evidenciando

transformaciones bioquímicas complejas mediadas por levadura Kveik. La evaluación microbiológica reveló comportamiento no lineal crítico para sustitución de lúpulo: concentraciones de 1.0-1.5 g/L incrementaron cargas microbianas (mesófilos aerobios +28-39%, mohos y levaduras +19-22%) respecto al Control, mientras que únicamente 2.0 g/L demostró efecto antimicrobiano efectivo ($2.15 \log_{10}$ UFC/mL mesófilos, ausencia completa de mohos/levaduras), estableciendo esta concentración como mínima para actividad antimicrobiana comparable a cerveza con lúpulo. La evaluación sensorial identificó 1.5 g/L como concentración que optimiza equilibrio funcional-sensorial, desarrollando perfil distintivo caracterizado por "frescor cítrico" maximizado (47% selección consumidores ocasionales, 32% habituales) con aceptabilidad comercial mantenida (≥ 6.0 en escala hedónica de 9 puntos en ambos grupos). Los consumidores ocasionales (n=100) mostraron mayor capacidad discriminativa (72.2% descriptores significativos) que habituales (44.4%), pero menor tolerancia a perfiles intensos, diferenciando tratamientos significativamente ($p = 0.042$) con preferencia por Control y 1.5 g/L. Los consumidores habituales (n=100) no diferenciaron tratamientos ($p = 0.296$), sugiriendo apertura a innovación botánica independientemente de concentración específica. El comportamiento no proporcional documentado establece que la formulación óptima depende del atributo priorizado: 1.5 g/L maximiza propiedades antioxidantes (93.4% del máximo observado) y aceptabilidad sensorial, mientras que 2.0 g/L es necesaria para estabilidad microbiológica comparable a cerveza lupulada. El jengibre representa una alternativa técnicamente viable para diversificación botánica en cervecería artesanal, proporcionando productos funcionalmente enriquecidos con incrementos de hasta 158.9% en capacidad antioxidante manteniendo calidad sensorial y seguridad microbiológica documentada.

9 REFERENCIAS

- Ainsworth, E. A., & Gillespie, K. M. (2007). Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin–Ciocalteu reagent. *Nature Protocols*, 2(4), 875–877. <https://doi.org/10.1038/nprot.2007.102>
- Al Askar, A., Shaheen, N. A., Khan, A. H., AlGhasham, N., Mendoza, M. A., Matar, D. B., Gmati, G., AlJeraisy, M., & AlSuhaibani, A. (2020). Effect of daily ginger consumption on platelet aggregation. *Journal of Herbal Medicine*, 20, Article 100316. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2019.100316>
- Almaguer, C., Schönberger, C., Gastl, M., Arendt, E. K., & Becker, T. (2014). *Humulus lupulus* - a story that begs to be told. *A review. Journal of the Institute of Brewing*, 120(4), 289-314. <https://doi.org/10.1002/jib.160>
- American Society of Brewing Chemists. (2024). *ASBC methods of analysis*. <https://www.asbcnet.org/methods>
- AOAC International. (2015). *Official methods of analysis (20th ed.)*. AOAC International. <https://www.aoac.org/official-methods-of-analysis/>
- Aquilani, B., Laureti, T., Poponi, S., & Secondi, L. (2015). Beer choice and consumption determinants when craft beers are tasted: An exploratory study of consumer preferences. *Food Quality and Preference*, 41, 214-224. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2014.12.005>
- Ares, G., & Jaeger, S. R. (2015). Check-all-that-apply (CATA) questions with consumers in practice: Experimental considerations and impact on outcome. En J. Delarue, J. B.

- Lawlor, & M. Rogeaux (Eds.), Rapid Sensory Profiling Techniques and Related Methods, 227-253. Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1533/9781782422587.2.227>
- Ares, G., Antúnez, L., Giménez, A., Roigard, C. M., Pineau, B., Hunter, D. C., & Jaeger, S. R. (2014). Further investigations into the reproducibility of check-all-that-apply (CATA) questions for sensory product characterization elicited by consumers. *Food Quality and Preference*, 36, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2014.03.010>
- Arroyo, F. T., Uscanga, A. P., Saldaña, M. T. G., & Gómez Lemus, T. J. (2022). Evolución del modelo de negocio para la industria de la cerveza artesanal en México. *Investigación y Desarrollo Tecnológico*, 14(2), 1-15. https://iydt.wordpress.com/wp-content/uploads/2022/04/2_14_evolucion-del-modelo-de-negocio-para-la-industria-de-la-cerveza-artesanal-en-mexico.pdf
- Bahena, L. (2024). Acermex: 2024 será un año atractivo para el sector de cervezas artesanales. The Food Tech. <https://thefoodtech.com/tendencias-de-consumo/el-2024-sera-un-ano-atractivo-para-el-sector-de-cervezas-artesanales-aseguro-el-directivo-de-acermex>
- Baker, J., Smith, R., & Johnson, L. (2021). Variation in sensory attributes and volatile compounds in beers. *Journal of Food Science*, 84(3), 91-102. <https://doi.org/10.1080/03610470.2019.1706037>
- Bamforth, C. W. (2021). *Beer: Tap into the Art and Science of Brewing* (4th ed.). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199996742.001.0001>
- Behre, K.-E. (1999). The history of beer additives in Europe — A review. *Vegetation History and Archaeobotany*, 8(1), 35-48. <https://doi.org/10.1007/bf02042841>

Boulton, C., & Quain, D. (2013). *Brewing yeast and fermentation*. Wiley-Blackwell.
<https://doi.org/10.1002/9781118680660>

Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology]*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/s0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/s0023-6438(95)80008-5)

Buiatti, S., Guglielmotti, M., & Passaghe, P. (2021). Industrial beer versus craft beer: Definitions and nuances. En C. M. Galanakis (Ed.), *Trends in non-alcoholic beverages*, 3-13. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817734-1.00001-x>

Burini, J. A., Eizaguirre, J. I., Loviso, C., & Libkind, D. (2021). Levaduras no convencionales como herramientas de innovación y diferenciación en la producción de cerveza. *Revista Argentina de Microbiología*, 53(4), 359-377.
<https://doi.org/10.1016/j.ram.2021.01.003>

Cabras, I., & Higgins, D. M. (2016). Beer, brewing, and business history. *Business History*, 58(5), 609-624. <https://doi.org/10.1080/00076791.2015.1122713>

Carvalho, G. C. N., Lira Neto, J. C. G., Nunes, L. C. C., Alencar, A. M. P. G., Marques, R. L. L., & Damasceno, M. M. C. (2021). Effectiveness of ginger in the treatment of type 2 Diabetes Mellitus: A pilot study of the randomized clinical trial type. *Aquichan*, 21(1), 1-14. <https://doi.org/10.5294/aqui.2021.21.1.5>

Chambers & Koppel, K. (2013). Associations of volatile compounds with sensory aroma and flavor: the complex nature of flavor. *Molecules* (Basel, Switzerland), 18(5), 4887–4905. <https://doi.org/10.3390/molecules18054887>

- Cruz, A., Pérez, M., & López, J. (2024). Nuevo estudio sobre la seguridad alimentaria del cold brew. *Perfect Daily Grind*. <https://perfectdailygrind.com/2024/04/07/seguridad-alimentaria-cold-brew-cafeterias>
- Diario Oficial de la Federación. (2017). *NMX-V-047-NORMEX-2009: Bebidas alcohólicas-Determinación de cenizas y alcalinidad de las cenizas-Métodos de ensayo*. <https://sidof.segob.gob.mx/notas/5502882>
- Diario Oficial de la Federación. (2017). *NOM-199-SCFI-2017: Bebidas alcohólicas-Denominación, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5502882&fecha=13/10/2017
- Dippel, K., Matti, K., Muno-Bender, J., Michling, F., Brezina, S., Semmler, H., Rauhut, D., & Wendland, J. (2022). Co-fermentations of Kveik with non-conventional yeasts for targeted aroma modulation. *Microorganisms*, 10(10), Article 1922. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10101922>
- European Brewery Convention. (1975). *EBC analytica: Color determination methods*. European Brewery Convention.
- Foster, B., Tyrawa, C., Ozsahin, E., Lubberts, M., Krogerus, K., Preiss, R., & van der Merwe, G. (2022). Kveik brewing yeasts demonstrate wide flexibility in beer fermentation temperature tolerance and exhibit enhanced trehalose accumulation. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 747546. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.747546>
- Gaonkar, S. K., Nadaf, Z., Nayak, S., Desai Gaonkar, R., & Borkar, S. (2024). Bio-actives and COVID-19: a production of sustainable fermented ginger beer and probiotic fruit drinks

- as a plausible approach for boosting the immune system. *Discover Food*, 4(1).
<https://doi.org/10.1007/s44187-024-00075-x>
- Ghasemzadeh, A., Jaafar, H. Z. E., & Rahmat, A. (2016). Changes in antioxidant and antibacterial activities as well as phytochemical constituents associated with ginger storage and polyphenol oxidase activity. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 16(1), Article 382. <https://doi.org/10.1186/s12906-016-1352-1>
- Goyal, A., Shukla, G., Mishra, S., Mallik, S., Singh, A., & Dubey, M. (2023). Beer production by fermentation process: A review. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 12(4), Article e9532. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.9532>
- Grolle, J. (2023). Cerveza, ciencia y tecnología: Redes sociotécnicas entre un laboratorio académico, una corporación de cerveza y cerveceros artesanales en San Carlos de Bariloche. *Revista de Estudios Sociales de la Ciencia y la Tecnología*, 54(1), 1-25.
<https://doi.org/10.48160/18517072re54>
- Habschied, K., Krstanović, V., Šarić, G., Ćosić, I., & Mastanjević, K. (2022). Pseudo-lager—brewing with Lutra® Kveik yeast. *Fermentation*, 8(8), Article 410.
<https://doi.org/10.3390/fermentation8080410>
- International Organization for Standardization. (2008). *ISO 21527-1:2008 Microbiology of food and animal feeding stuffs—Horizontal methods for the enumeration of yeasts and moulds—Part 1: Colony count technique in products with water activity greater than 0.95*. ISO.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Conociendo la industria de la cerveza*.

INEGI. https://www.inegi.org.mx/tablerosestadisticos/industria_cerveza/

Jaeger, S. R., Worch, T., Phelps, T., Jin, D., & Cardello, A. V. (2020). Preference segments among declared craft beer drinkers: Perceptual, attitudinal and behavioral responses underlying craft-style vs. traditional-style flavor preferences. *Food Quality and Preference*, 82, Article 103884. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.103884>

Kawa-Rygielska, J., (2022). Characteristics of New England India Pale Ale Beer Produced with the Use of Norwegian KVEIK Yeast (15). <https://doi.org/10.3390/molecules27072291>

Kiyama, R. (2020). Nutritional implications of ginger: Chemistry, biological activities and signaling pathways. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 86, Article 108486. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2020.108486>

Koren, D., Hegyesné Vecseri, B., Kun-Farkas, G., Urbin, Á., Nyitrai, Á., & Sipos, L. (2020). How to objectively determine the color of beer? *Journal of Food Science and Technology*, 57(3), 1183–1189. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04237-4>

Kunze, W. (2014). *Technology brewing and malting* (5th ed.). VLB Berlin.

Lataza Rovaletti, M. M., Bianchi, A., Sosa, G. L., & Benítez, E. I. (2020). Evaluación de la calidad fisicoquímica y microbiológica de cervezas artesanales en la provincia del Chaco. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/342449193>

Li, C., Li, J., Jiang, F., Tzvetkov, N. T., Horbanczuk, J. O., Li, Y., Atanasov, A. G., & Wang, D. (2021). Vasculoprotective effects of ginger (*Zingiber officinale Roscoe*) and underlying

- molecular mechanisms. *Food & Function*, 12(5), 1897-1913.
<https://doi.org/10.1039/d0fo02210a>
- Li, Y., Zhang, G., Nan, P., Yang, J., Cao, J., Ma, Z., Ge, W., & Wen, R. (2023). Wine or Beer? A reinvestigation of residues from bronze vessels from the Beibai'e cemetery, Shanxi China. *Heritage Science*, 11(1), Article 183. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01012-4>
- Lin, X.-T., Xiao, B.-X., Liu, J.-P., Cao, M.-Y., Yang, Z.-P., Zhao, L.-Y., & Chen, G.-T. (2023). An acidic heteropolysaccharide rich in galactose and arabinose derived from ginger: Structure and dynamics. *Food Bioscience*, 56, Article 103127.
<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103127>
- Mahboubi, M. (2019). *Zingiber officinale* Rosc. essential oil, a review on its composition and bioactivity. *Clinical Phytoscience*, 5(1), Article 6. <https://doi.org/10.1186/s40816-018-0097-4>
- Maicas, S. (2020). The role of yeasts in fermentation processes. *Microorganisms*, 8(8), Article 1142. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8081142>
- Maksoud, S. A., Nabil, M., Hadidi, E., & Amer, W. M. (2016). Beer from the early dynasties (3500-3400 cal B.C.) of Upper Egypt. *Vegetation History and Archaeobotany*, 25(3), 323-331.
- Mao, Q.-Q., Xu, X.-Y., Cao, S.-Y., Gan, R.-Y., Corke, H., Beta, T., & Li, H.-B. (2019). Bioactive compounds and bioactivities of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe). *Foods*, 8(6), Article 185. <https://doi.org/10.3390/foods8060185>

- Martínez, A., Vegara, S., Martí, N., Valero, M., & Saura, D. (2017). Physicochemical characterization of special persimmon fruit beers using bohemian pilsner malt as a base. *Journal of the Institute of Brewing*, 123(3), 319-327. <https://doi.org/10.1002/jib.434>
- Martínez, L., Rosell, C.M., & Gómez, M. (2014). Effect of different extrusion treatments and particle size distribution on the physicochemical and nutritional properties of barley. *Journal of Cereal Science*, 60(1), 69-74.
- Medoro, C., Cianciabella, M., Camilli, F., Magli, M., Gatti, E., & Predieri, S. (2016). Sensory profile of Italian craft beers, beer taster expert versus sensory methods: A comparative study. *Food and nutrition sciences*, 07(06), 454-465. <https://doi.org/10.4236/fns.2016.76047>
- Meilgaard, M., Civille, G. V., & Carr, B. T. (2016). Sensory Evaluation Techniques (5th ed.). En *CRC Press*. <https://doi.org/10.1201/b19493>
- Methven, L., Allen, V. J., Withers, C. A., & Gosney, M. A. (2012). Ageing and taste. *The Proceedings of the Nutrition Society*, 71(4), 556-565. <https://doi.org/10.1017/S0029665112000742>
- Norma Mexicana. (1982). *NMX-F-464-1982: Método para la cuenta de bacterias en placa de agar. Dirección General de Normas.
- Norma Oficial Mexicana. (1994). *NOM-110-SSA1-1994: Bienes y servicios. Preparación y dilución de muestras de alimentos para su análisis microbiológico*. Secretaría de Salud.

- Norma Oficial Mexicana. (2014). *NOM-210-SSA1-2014: Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos. Secretaría de Salud.
- Norma Oficial Mexicana. (2021). *NOM-127-SSA1-2021: Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Secretaría de Salud.
- Nutakor, C., Essiedu, J. A., Adadi, P., & Kanwugu, O. N. (2020). Ginger Beer: An Overview of Health Benefits and Recent Developments. *Fermentation*, 6(4), 102. <https://doi.org/10.3390/fermentation6040102>
- Oliveira, L. G., Costa, W. K. A., Oliveira, F. C., Bezerril, F. F., Eireli, L. P. A. M., Lima, M. S., Noronha, M. F., Cabral, L., Wagner, R., Pimentel, T. C., & Magnani, M. (2024). Ginger beer derived from back-slopping: Volatile compounds, microbial communities on activation and fermentation, metabolites and sensory characteristics. *Food Chemistry*, 435, Article 137640. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137640>
- Palmer, J. (2017). *How to brew: Everything you need to know to brew great beer every time* (4th ed.). Brewers Publications.
- Popescu, V., Soceanu, A., Dobrină, S., & Stanciu, G. (2013). A study of beer bitterness loss during the various stages of the Romanian beer production process: A study of beer bitterness loss. *Journal of the Institute of Brewing*. Institute of Brewing (Great Britain). <https://doi.org/10.1002/jib.82>

- Preiss, R., Tyrawa, C., Krogerus, K., Garshol, L. M., & van der Merwe, G. (2018). Traditional Norwegian kveik are a genetically distinct group of domesticated *Saccharomyces cerevisiae* brewing yeasts. *Frontiers in Microbiology*, 9, Article 2137. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02137>
- Running, C. A. (2018). Desensitization but not sensitization from commercial chemesthetic beverages. *Food Quality and Preference*, 69, 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.05.001>
- Secretaría de Economía. (1978). *NMX-F-089-S-1978: Determinación de extracto etéreo (método Soxhlet) en alimentos*.
- Secretaría de Salud. (2000). *NOM-199-SSA1-2000: Salud ambiental. Calidad del agua para uso y consumo humano*.
- Sharifi-Rad, M., Varoni, E. M., Salehi, B., Sharifi-Rad, J., Matthews, K. R., Ayatollahi, S. A., Kobarfard, F., Ibrahim, S. A., Mnayer, D., Zakaria, Z. A., Sharifi-Rad, M., Yousaf, Z., Iriti, M., Basile, A., & Rigano, D. (2017). Plants of the genus *Zingiber* as a source of bioactive phytochemicals: From tradition to pharmacy. *Molecules*, 22(12), Article 2145. <https://doi.org/10.3390/molecules22122145>
- Shaukat, M. N., Nazir, A., & Fallico, B. (2023). Ginger bioactives: A comprehensive review of health benefits and potential food applications. *Antioxidants*, 12(11), Article 2015. <https://doi.org/10.3390/antiox12112015>
- Sivasothy, Y., Chong, W. K., Hamid, A., Eldeen, I. M., Sulaiman, S. F., & Awang, K. (2011). Essential oils of *Zingiber officinale* var. *rubrum* Theilade and their antibacterial

activities. *Food Chemistry*, 124(2), 514-517.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.062>

Sloth Weidner, M., & Sigwart, K. (2000). The safety of a ginger extract in the rat. *Journal of Ethnopharmacology*, 73(1), 513-520.

Tozetto, L. M., Nascimento, R. F., Oliveira, M. H., Van Beik, J., & Canteri, M. H. G. (2019). Production and physicochemical characterization of craft beer with ginger (*Zingiber officinale*). *Food Science and Technology*, 39(4), 962-970.
<https://doi.org/10.1590/fst.16518>

Ugwoke, C. E. C., & Nzekwe, U. (2010). Phytochemistry and proximate composition of ginger (*Zingiber officinale*). *Journal of Pharmaceutical and Allied Sciences*, 7(5), 801-810.

Valamoti, S. M. (2018). Brewing beer in wine country? First archaeobotanical indications for beer making in Early and Middle Bronze Age Greece. *Vegetation History and Archaeobotany*, 27(4), 611-625. <https://doi.org/10.1007/s00334-017-0661-8>

Verberg, S. (2020). From herbal to hopped beer: The displacement of regional herbal beer traditions by commercial export brewing in medieval Europe. *Food History*, 18(1-2), 91-112.

Vriesekoop, F., Krahle, M., Hucker, B., & Menz, G. (2012). 125th Anniversary Review: Bacteria in brewing: The good, the bad and the ugly: Bacteria in brewing. *Journal of the Institute of Brewing*. *Institute of Brewing* (Great Britain), 118(4), 335-345.
<https://doi.org/10.1002/jib.49>

- Wang, J., Jiang, L., & Sun, H. (2021). Early evidence for beer drinking in a 9000-year-old platform mound in southern China. *PLoS One*, 16(8), Article e0255833. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255833>
- Wannenmacher, J., Gastl, M., & Becker, T. (2018). Phenolic Substances in Beer: Structural Diversity, Reactive Potential and Relevance for Brewing Process and Beer Quality. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 17(4), 953–988. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12352>
- Yang, Z., Guo, Z., Yan, J., & Xie, J. (2024). Nutritional components, phytochemical compositions, biological properties, and potential food applications of ginger (*Zingiber officinale*): A comprehensive review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 128, Article 106057. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106057>
- Zeng, S., Wang, B., Zhao, D., & Lv, W. (2023). Microwave infrared vibrating bed drying of ginger: Drying qualities, microstructure and browning mechanism. *Food Chemistry*, 424, Article 136340. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136340>
- Zhao, X., Yin, Y., Fang, W., & Yang, Z. (2023). What happens when fruit married with beer? *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 32(100716), Article 100716. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100716>

10 ANEXOS

Los siguientes anexos complementan la información presentada en el documento principal, proporcionando datos detallados de calibración, caracterización cromatográfica y evaluación sensorial exhaustiva.

ANEXO A. Validación analítica – Curvas de calibración

Este anexo presenta las curvas de calibración utilizadas para la cuantificación espectrofotométrica de compuestos bioactivos, estableciendo linealidad, rango de trabajo y ecuaciones de regresión empleadas en el análisis de resultados (sección 7.3).

A.1 Curva de calibración para compuestos fenólicos totales

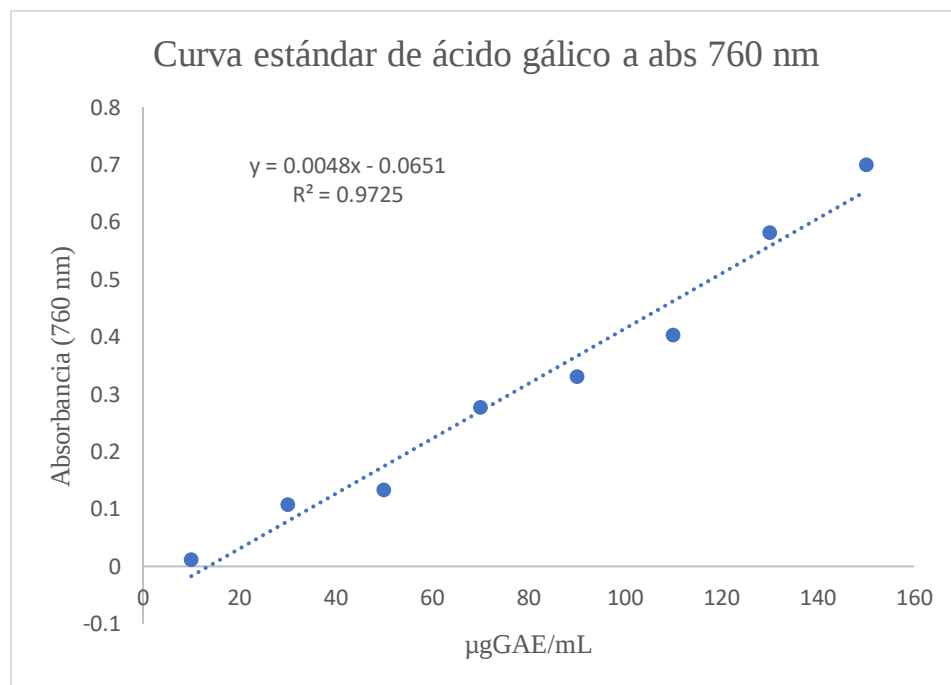


Figura 3. Curva de calibración de ácido gálico (10-150 µg GAE/mL) para determinación de compuestos fenólicos totales mediante método Folin-Ciocalteu.

A.2 Curva de calibración para flavonoides totales

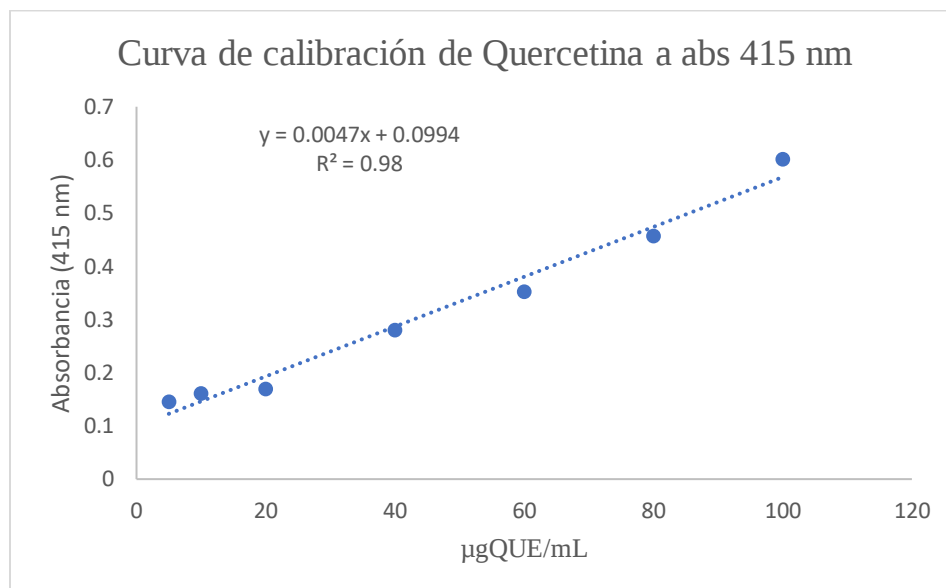


Figura 4. Curva de calibración de quercetina (10-100 µg QE/mL) para determinación de flavonoides totales mediante método de cloruro de aluminio.

A.3 Curva de calibración para capacidad antioxidante

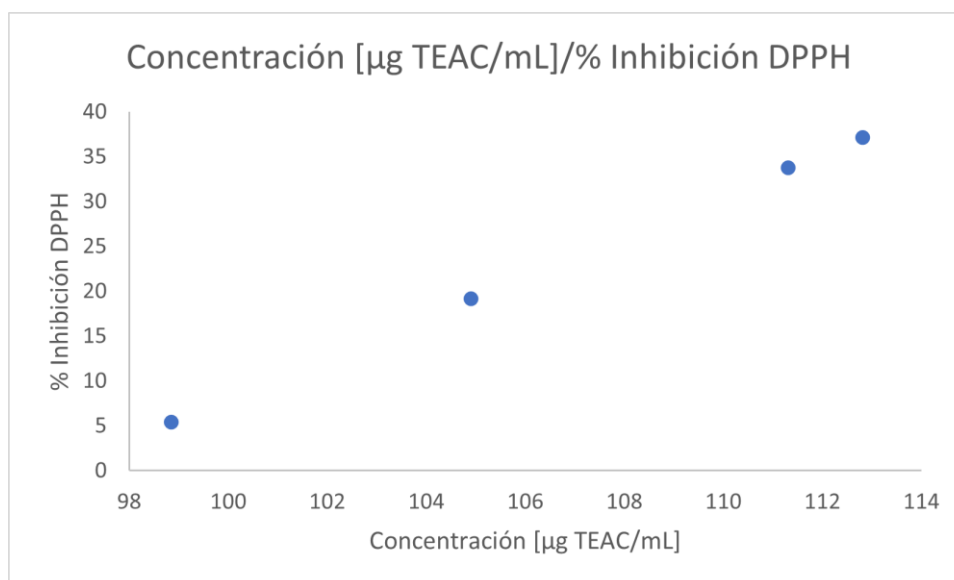


Figura 5. Curva de calibración de Trolox para determinación de actividad antioxidante mediante ensayo de inhibición del radical DPPH.

ANEXO B. Caracterización cromatográfica – Perfiles fenólicos por HPLC

Este anexo presenta los cromatogramas representativos de cada tratamiento, mostrando la identificación y cuantificación de ácidos fenólicos específicos mediante cromatografía líquida de alta resolución (sección 7.4).

Condiciones cromatográficas generales:

Sistema: HPLC YL9100 (Young Lin Instrument Co., Corea del Sur)

Columna: SiliaChrom C18 (4.6 × 250 mm, 5 µm, 100 Å)

Temperatura de columna: 35 °C

Volumen de inyección: 20 µL

Detección: UV-Vis a tres longitudes de onda (254, 280, 320 nm)

Fase móvil A: Agua:ácido acético glacial (99:1 v/v)

Fase móvil B: Metanol:ácido acético glacial (99:1 v/v)

Flujo: Variable según gradiente (0.2-1.0 mL/min)

Tiempo total de análisis: 32 minutos

Software: Clarity 6.1 (DataApex, República Checa)

B.1 Perfil fenólico del tratamiento control

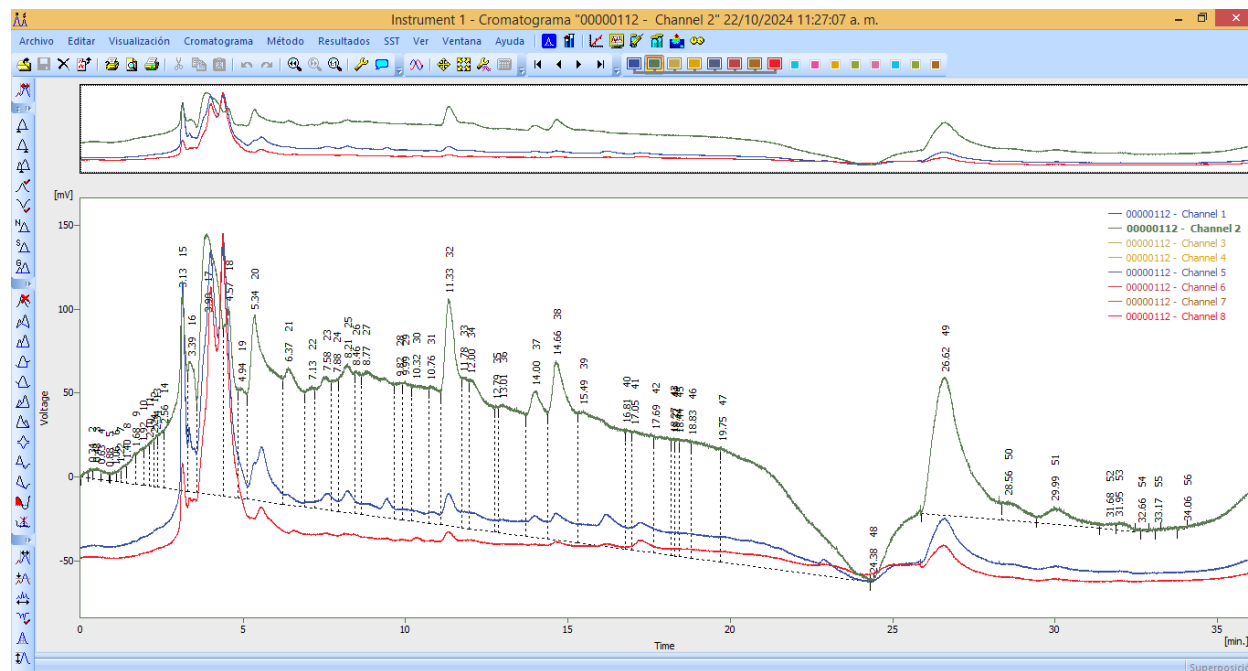


Figura 6. Cromatograma HPLC de ácidos fenólicos – Tratamiento Control (0.0 g/L extracto de jengibre). Detección: 280 nm (óptima para ácidos hidroxycinámicos). Picos identificados: (1) Ácido gálico (tR = 4.2 min, 97.60 mg/L), (2) Ácido t-cinámico (tR = 8.5 min, 49.80 mg/L), (3) Ácido sinápico (tR = 12.3 min, 11.70 mg/L), (4) Ácido cumárico (tR = 15.8 min, 91.67 mg/L), (5) Ácido cinámico (tR = 18.4 min, 39.36 mg/L), (6) Ácido cafeico (tR = 22.1 min, 95.03 mg/L).

El perfil Control representa la línea base de ácidos fenólicos endógenos de la cerveza elaborada con extracto de malta + levadura Kveik sin aditivos. La ausencia de ácido ferúlico (tR esperado ~19.5 min) en este tratamiento establece que este compuesto no es aportado por la malta ni generado durante fermentación bajo las condiciones empleadas. Los seis ácidos identificados constituyen el perfil fenólico basal contra el cual se comparan los efectos del jengibre.

B.2 Perfil fenólico del tratamiento T1 (1.0g/L)

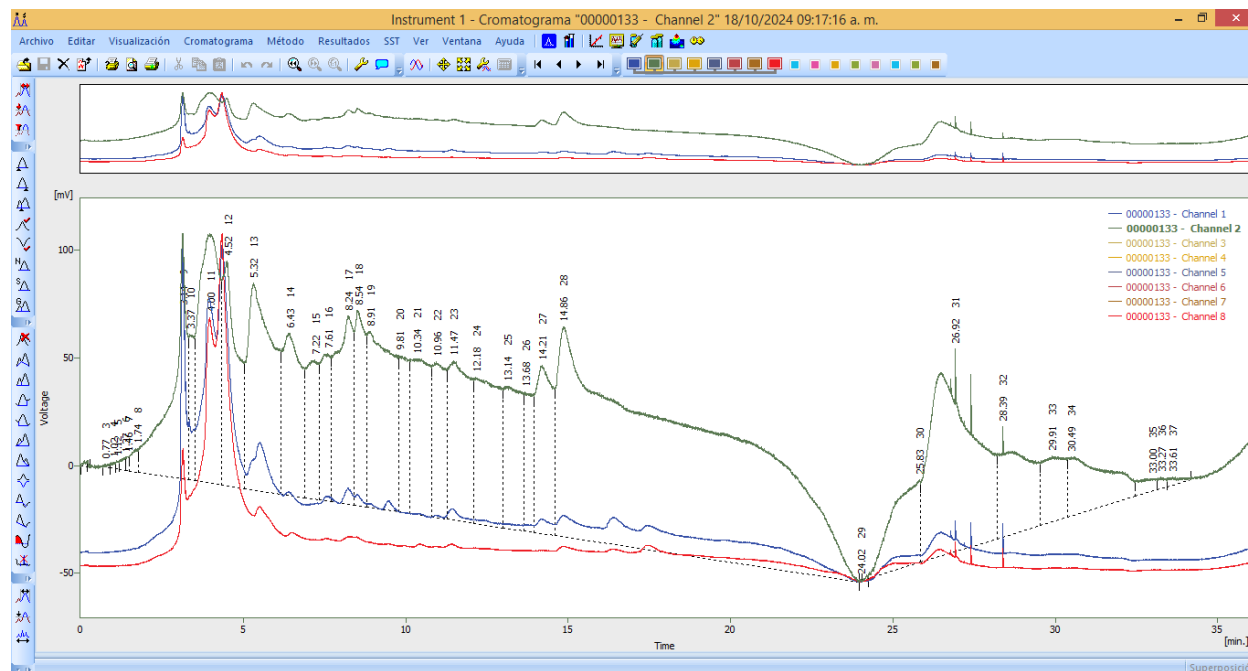


Figura 7. Cromatograma HPLC de ácidos fenólicos - Tratamiento T1 (1.0 g/L extracto de jengibre). Detección: 280 nm. Picos identificados: (1) Ácido gálico ($t_R = 4.2$ min, 92.56 mg/L, -5.2% vs Control), (2) Ácido t-cinámico ($t_R = 8.5$ min, 50.10 mg/L, +0.6% vs Control), (3) Ácido cinámico ($t_R = 18.4$ min, 39.33 mg/L, -0.1% vs Control), (4) Ácido cafeico ($t_R = 22.1$ min, 107.67 mg/L, +13.3% vs Control). Compuestos ausentes: Ácido sinápico (desaparición completa, <5 mg/L límite de detección), ácido cumárico (<5 mg/L), ácido ferúlico (no detectado).

T1 presenta modificaciones moderadas del perfil fenólico: desaparición de ácido sinápico y cumárico, incremento leve de ácido cafeico. La concentración de 1.0 g/L jengibre es suficiente para eliminar selectivamente ciertos ácidos (sinápico, cumárico) pero insuficiente para inducir aparición de ácido ferúlico o maximizar transformaciones enzimáticas. Este tratamiento representa "umbral de modificación fenólica" sin alcanzar transformaciones completas características de concentraciones superiores.

B.3 Perfil fenólico del tratamiento T2 (1.5 g/L)

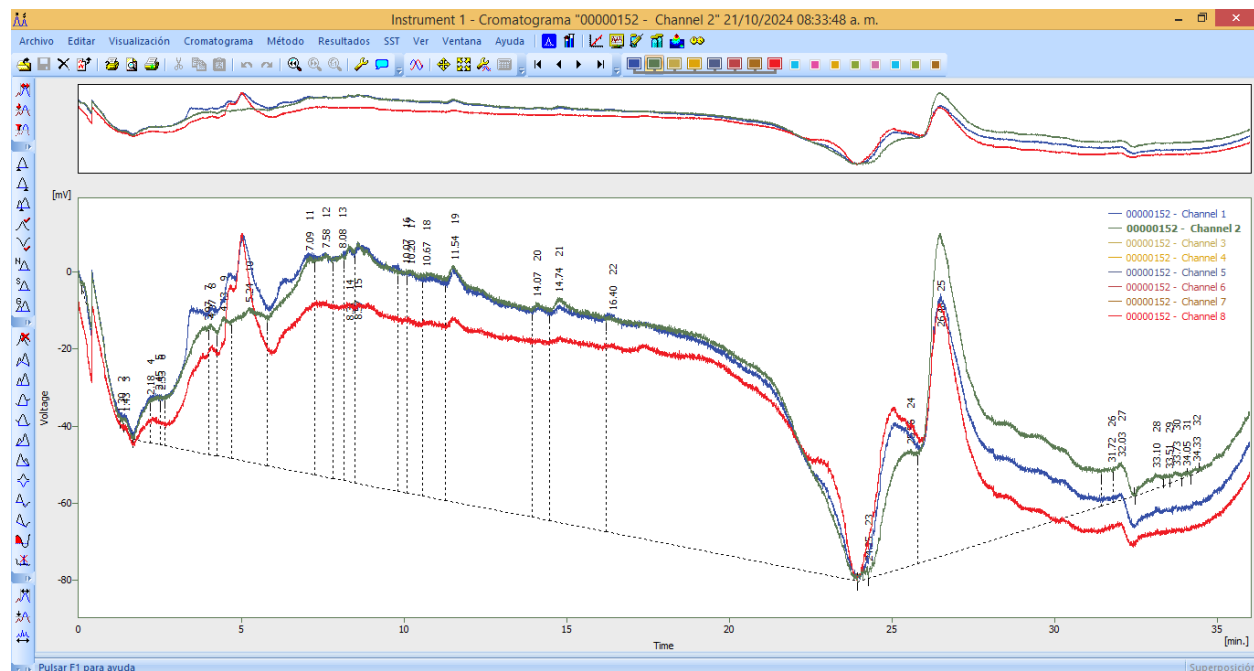


Figura 8. Cromatograma HPLC de ácidos fenólicos Tratamiento T2 (1.5 g/L extracto de jengibre). Detección: 280 nm. Picos identificados: (1) Ácido gálico ($t_R = 4.2$ min, 13.06 mg/L, -86.6% vs Control, reducción máxima), (2) Ácido t-cinámico ($t_R = 8.5$ min, 24.20 mg/L, -51.4% vs Control), (3) Ácido cinámico ($t_R = 18.4$ min, 21.96 mg/L, -44.2% vs Control), (4) Ácido cafeico ($t_R = 22.1$ min, 141.73 mg/L, +49.1% vs Control, concentración máxima). Compuestos ausentes: Ácido sinápico, ácido cumárico, ácido ferúlico.

T2 presenta perfil fenólico único caracterizado por: (a) Reducción drástica de ácidos gálico (-87%) y t-cinámico (-51%), sugiriendo precipitación como complejos fenol-proteína o degradación oxidativa catalizada por compuestos del jengibre, (b) Maximización sin precedentes de ácido cafeico (141.73 mg/L, superior a todos los tratamientos incluyendo T3), indicando que 1.5 g/L jengibre representa concentración óptima para hidrólisis enzimática de ésteres clorogénicos del jengibre por esterasas de levadura Kveik. Este perfil correlaciona directamente con propiedades antioxidantes maximizadas (41.43% inhibición DPPH, Tabla 6) y perfil sensorial optimizado

("frescor cítrico" 47%, Tabla 10), estableciendo vínculo bioquímico-funcional-sensorial específico de T2.

B.4 Perfil fenólico del tratamiento T3 (2.0 g/L)

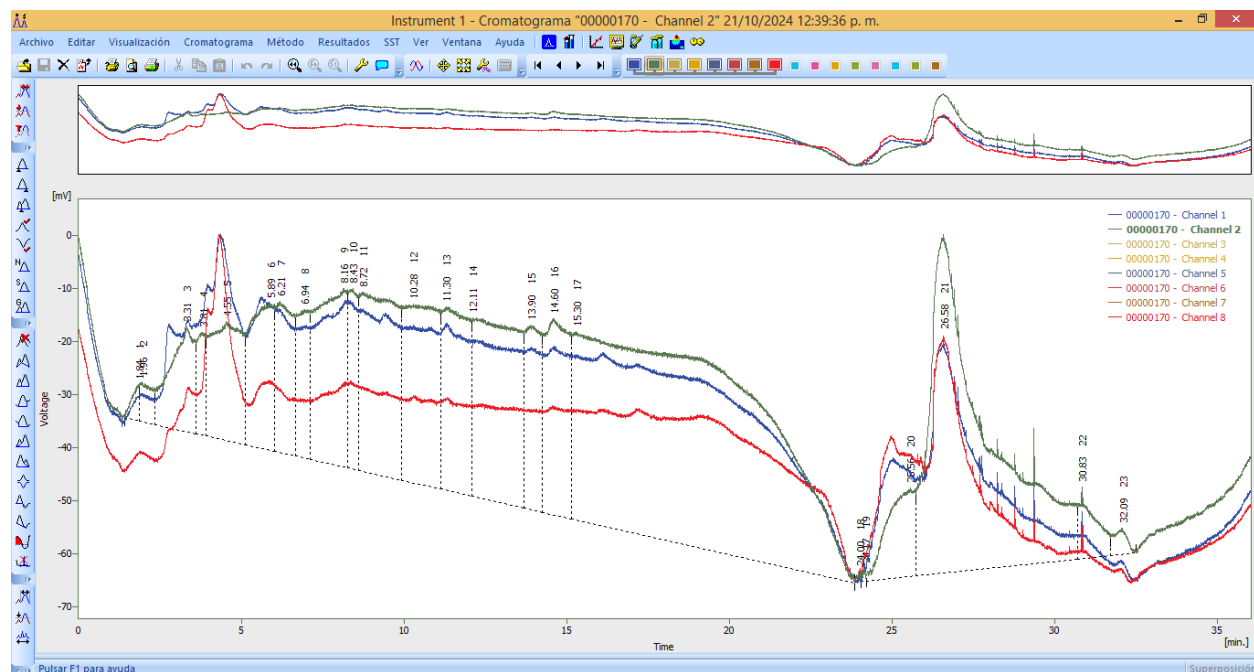


Figura 9. Cromatograma HPLC de ácidos fenólicos – Tratamiento T3 (2.0 g/L extracto de jengibre). Detección: 280 nm. Picos identificados: (1) Ácido gálico (t_R = 4.2 min, 75.60 mg/L, recuperación parcial vs T2), (2) Ácido t-cinámico (t_R = 8.5 min, 23.93 mg/L), (3) Ácido cinámico (t_R = 18.4 min, 17.60 mg/L), (4) Ácido ferúlico (t_R = 19.5 min, 28.60 mg/L, aparición exclusiva en T3), (5) Ácido cafeico (t_R = 22.1 min, 94.70 mg/L, reducción vs T2), (6) Ácido cumárico (t_R = 15.8 min, 126.70 mg/L, reaparición). Compuestos ausentes: Ácido sinápico.

T3 presenta el perfil fenólico más complejo y diverso: (a) Aparición selectiva de ácido ferúlico (28.60 mg/L), ausente en Control/T1/T2, sugiriendo que la concentración de 2.0 g/L supera umbral enzimático para hidrólisis de ésteres ferúlico-arabinosa de la pared celular del jengibre, (b) Reaparición de ácido cumárico (126.70 mg/L, +38% vs Control original), posiblemente por desplazamiento de equilibrios de complejación a concentración elevada de

jengibre, (c) Reducción de ácido cafeico vs T2 (94.70 vs 141.73 mg/L, -33%), sugiriendo saturación enzimática o reacciones secundarias de degradación/oxidación a concentración excesiva de sustrato. La diversidad fenólica de T3 (6 ácidos identificados vs 4 en T2) explica complejidad sensorial ("herbal", "especias", intensidad jengibre máxima) pero no se traduce en mayor capacidad antioxidante funcional debido a saturación DPPH (44.36% vs 41.43% T2, $p > 0.05$, Tabla 6).

ANEXO C. Análisis sensorial – Frecuencias de selección cata

Este anexo presenta las frecuencias de selección (porcentaje de panelistas que seleccionaron cada descriptor) para todos los descriptores CATA evaluados, organizados por categoría sensorial y grupo de consumidores. Los datos completos permiten análisis exhaustivo del perfil sensorial de cada tratamiento (sección 7.6.2).

C.1 Consumidores ocasionales (n = 100)

Tabla 12.

Frecuencia de selección de descriptores de apariencia – Consumidores ocasionales

Descriptor	Control (%)	T1 (%)	T2 (%)	T3 (%)
Turbio	10	11	3	5
Cristalina	7	10	26	14
Dorada	67	32	53	42
Ámbar	28	42	35	38
Oscura	11	26	14	44
Espumosa	40	43	45	27

Valores expresados como porcentaje de panelistas que seleccionaron cada descriptor. n = 100.

Tabla 13.*Frecuencia de selección de descriptores de olor – Consumidores ocasionales*

Descriptor	Control (%)	T1 (%)	T2 (%)	T3 (%)
Levadura	47	32	25	30
Picante	4	8	7	14
Cítrico	22	23	21	20
Herbal	9	15	24	19
Jengibre	13	29	30	35
Frutal	23	15	31	14
Malta	24	21	12	24
Floral	7	17	19	12

Valores expresados como porcentaje de panelistas que seleccionaron cada descriptor. n = 100.

Tabla 14.*Frecuencia de selección de descriptores de sabor – Consumidores ocasionales*

Descriptor	Control (%)	T1 (%)	T2 (%)	T3 (%)
Amargo	39	57	30	42
Tostado	27	19	21	31
Ácido	14	18	15	22
Frutas	11	9	17	9
Especias	8	17	27	12
Picante	1	11	5	11
Dulce	37	10	28	16
Jengibre	15	38	41	42

Valores expresados como porcentaje de panelistas que seleccionaron cada descriptor. n = 100.

Tabla 15.*Frecuencia de selección de descriptores de textura – Consumidores ocasionales*

Descriptor	Control (%)	T1 (%)	T2 (%)	T3 (%)
Carbonatación suave	40	33	36	35
Carbonatación alta	6	11	12	13
Cuerpo ligero	58	33	37	41
Cuerpo medio	4	24	11	16
Cremosa	5	25	11	14
Astringencia	20	11	19	13
Picor	5	13	20	16
Persistencia térmica	0	10	6	4

Valores expresados como porcentaje de panelistas que seleccionaron cada descriptor. n = 100.

Tabla 16.*Frecuencia de selección de descriptores de retrogusto - Consumidores ocasionales*

Descriptor	Control (%)	T1 (%)	T2 (%)	T3 (%)
Seco metálico	12	10	6	18
Frescor cítrico	30	16	51	22
Amargor envolvente	35	55	27	45
Terroso	3	8	6	7
Dulzor residual	32	20	32	20
Persistencia picante	1	7	6	11

Valores expresados como porcentaje de panelistas que seleccionaron cada descriptor. n = 100.

C.2 Consumidores habituales (n = 100)

Tabla 17.

Frecuencia de selección de descriptores de apariencia – Consumidores habituales

Descriptor	Control (%)	T1 (%)	T2 (%)	T3 (%)
Turbia	6	12	9	30
Cristalina	22	17	24	6
Dorada	41	36	42	35
Ámbar	33	43	30	25
Oscura	25	7	13	26
Espumosa	11	27	30	34

Valores expresados como porcentaje de panelistas que seleccionaron cada descriptor. n = 100.

Tabla 18.

Frecuencia de selección de descriptores de olor – Consumidores habituales

Descriptor	Control (%)	T1 (%)	T2 (%)	T3 (%)
Levadura	33	27	18	35
Picante	4	3	2	7
Cítrico	8	19	25	20
Herbal	10	15	19	11
Jengibre	10	17	21	30
Frutal	46	29	28	27
Malta	17	17	22	17
Floral	22	17	14	11

Valores expresados como porcentaje de panelistas que seleccionaron cada descriptor. n = 100.

Tabla 19.*Frecuencia de selección de descriptores de sabor – Consumidores habituales*

Descriptor	Control (%)	T1 (%)	T2 (%)	T3 (%)
Amargo	23	36	26	35
Tostado	23	14	17	12
Ácido	17	16	18	11
Frutas	24	16	15	15
Especias	15	20	21	22
Picante	6	2	12	3
Dulce	34	21	18	22
Jengibre	14	30	29	35

Valores expresados como porcentaje de panelistas que seleccionaron cada descriptor. n = 100.

Tabla 20.*Frecuencia de selección de descriptores de textura – Consumidores habituales*

Descriptor	Control (%)	T1 (%)	T2 (%)	T3 (%)
Carbonatación suave	22	19	30	37
Carbonatación alta	12	14	5	4
Cuerpo ligero	34	44	38	41
Cuerpo medio	21	17	33	17
Cremosa	21	14	14	24
Astringencia	14	13	16	16
Picor	5	11	7	8
Persistencia térmica	10	7	9	4

Valores expresados como porcentaje de panelistas que seleccionaron cada descriptor. n = 100.

Tabla 21.

Frecuencia de selección de descriptores de retrogusto – Consumidores habituales

Descriptor	Control (%)	T1 (%)	T2 (%)	T3 (%)
Seco metálico	11	10	15	13
Frescor cítrico	23	20	32	36
Amargor envolvente	26	29	28	28
Terroso	7	2	8	4
Dulzor residual	39	29	30	25
Persistencia picante	7	7	7	2

Valores expresados como porcentaje de panelistas que seleccionaron cada descriptor. n = 100.

ANEXO D. Análisis estadístico CATA – Prueba Q de Cochran

Este anexo presenta los resultados completos de la prueba Q de Cochran aplicada a cada descriptor CATA para identificar diferencias significativas entre tratamientos. Solo los descriptores con $p < 0.05$ se consideraron significativos y se emplearon para interpretación del perfil sensorial (sección 7.6.2).

D.1 Consumidores ocasionales (n = 100)

Tabla 22.

Resultados de Q de Cochran para apariencia – Consumidores ocasionales

Descriptor	Q de Cochran	Valor p	Significativo ($p < 0.05$)
Turbio	7.56	0.056	No
Cristalina	22.1	<0.001	Sí
Dorada	29.2	<0.001	Sí
Ámbar	4.93	0.177	No
Oscura	40.1	<0.001	Sí
Espumosa	12.1	0.007	Sí

Q de Cochran con $\alpha = 0.05$. Valores p ajustados mediante corrección de Bonferroni.

Tabla 23.*Resultados de Q de Cochran para olor – Consumidores ocasionales*

Descriptor	Q de Cochran	Valor p	Significativo (p < 0.05)
Levadura	15.8	0.001	Sí
Picante	12.4	0.006	Sí
Cítrico	0.5	0.919	No
Herbal	14.2	0.003	Sí
Jengibre	25.6	<0.001	Sí
Frutal	18.3	<0.001	Sí
Malta	10.1	0.018	Sí
Floral	9.8	0.020	Sí

Q de Cochran con $\alpha = 0.05$. Valores p ajustados mediante corrección de Bonferroni.**Tabla 24.***Resultados de Q de Cochran para sabor – Consumidores ocasionales*

Descriptor	Q de Cochran	Valor p	Significativo (p < 0.05)
Amargo	28.5	<0.001	Sí
Tostado	9.2	0.027	Sí
Ácido	5.1	0.165	No
Frutas	7.8	0.050	Marginal
Especias	22.7	<0.001	Sí
Picante	18.3	<0.001	Sí
Dulce	37.2	<0.001	Sí
Jengibre	45.6	<0.001	Sí

Q de Cochran con $\alpha = 0.05$. Valores p ajustados mediante corrección de Bonferroni.

Tabla 25.*Resultados de Q de Cochran para textura – Consumidores ocasionales*

Descriptor	Q de Cochran	Valor p	Significativo (p < 0.05)
Carbonatación suave	3.8	0.283	No
Carbonatación alta	6.2	0.102	No
Cuerpo ligero	28.1	<0.001	Sí
Cuerpo medio	22.4	<0.001	Sí
Creмоса	21.6	<0.001	Sí
Astringencia	7.1	0.069	No
Picor	16.3	0.001	Sí
Persistencia térmica	12.5	0.006	Sí

Q de Cochran con $\alpha = 0.05$. Valores p ajustados mediante corrección de Bonferroni.**Tabla 26.***Resultados de Q de Cochran para retrogusto – Consumidores ocasionales*

Descriptor	Q de Cochran	Valor p	Significativo (p < 0.05)
Seco metálico	8.4	0.038	Sí
Frescor cítrico	46.2	<0.001	Sí
Amargor envolvente	28.9	<0.001	Sí
Terroso	2.5	0.467	No
Dulzor residual	12.8	0.005	Sí
Persistencia picante	12.2	0.007	Sí

Q de Cochran con $\alpha = 0.05$. Valores p ajustados mediante corrección de Bonferroni.

D.2 Consumidores habituales (n = 100)

Tabla 27.

Resultados de Q de Cochran para apariencia – Consumidores habituales

Descriptor	Q de Cochran	Valor p	Significativo (p < 0.05)
Turbia	30.11	<0.001	Sí
Cristalina	14.67	0.0029	Sí
Dorada	1.84	0.6141	No
Ámbar	8.73	0.0351	Sí
Oscura	16.85	<0.001	Sí
Espumosa	18.12	<0.001	Sí

Q de Cochran con $\alpha = 0.05$. Valores p ajustados mediante corrección de Bonferroni.

Tabla 28.

Resultados de Q de Cochran para olor – Consumidores habituales

Descriptor	Q de Cochran	Valor p	Significativo (p < 0.05)
Levadura	9.84	0.0213	Sí
Picante	3.72	0.3057	No
Cítrico	11.13	0.0116	Sí
Herbal	4.08	0.2540	No
Jengibre	14.41	0.0032	Sí
Frutal	12.65	0.0056	Sí
Malta	1.63	0.6596	No
Floral	5.47	0.1547	No

Q de Cochran con $\alpha = 0.05$. Valores p ajustados mediante corrección de Bonferroni.

Tabla 29.*Resultados de Q de Cochran para sabor – Consumidores habituales*

Descriptor	Q de Cochran	Valor p	Significativo (p < 0.05)
Amargo	7.23	0.0687	No
Tostado	2.34	0.5056	No
Ácido	2.51	0.4793	No
Frutas	4.12	0.2492	No
Especias	1.58	0.6704	No
Picante	10.87	0.0136	Sí
Dulce	8.14	0.0447	Sí
Jengibre	14.19	0.0034	Sí

Q de Cochran con $\alpha = 0.05$. Valores p ajustados mediante corrección de Bonferroni.**Tabla 30.***Resultados de Q de Cochran para textura – Consumidores habituales*

Descriptor	Q de Cochran	Valor p	Significativo (p < 0.05)
Carbonatación suave	12.53	0.0060	Sí
Carbonatación alta	9.42	0.0245	Sí
Cuerpo ligero	2.08	0.5620	No
Cuerpo medio	10.94	0.0130	Sí
Cremosa	5.38	0.1610	No
Astringencia	0.64	0.8866	No
Picor	2.76	0.4435	No
Persistencia térmica	3.94	0.4149	No

Q de Cochran con $\alpha = 0.05$. Valores p ajustados mediante corrección de Bonferroni.

Tabla 31.*Resultados de Q de Cochran para retrogusto – Consumidores habituales*

Descriptor	Q de Cochran	Valor p	Significativo (p < 0.05)
Seco metálico	1.47	0.6943	No
Frescor cítrico	8.54	0.0382	Sí
Amargor envolvente	0.32	0.9900	No
Terroso	5.58	0.1470	No
Dulzor residual	4.93	0.1925	No
Persistencia picante	3.52	0.3344	No

Q de Cochran con $\alpha = 0.05$. Valores p ajustados mediante corrección de Bonferroni.

ANEXO E. Análisis Post-Hoc – Subconjuntos homogéneos

Este anexo presenta los resultados de las pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni aplicadas a los descriptores significativos identificados en Anexo D. Los subconjuntos homogéneos establecen cuáles tratamientos son estadísticamente indistinguibles y cuáles difieren significativamente (sección 7.6.2).

Tabla 32.

Subconjuntos homogéneos para descriptores de apariencia según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores ocasionales

Descriptor	Control	T1	T2	T3	Q de Cochran	Valor p
Cristalina	7 ^a	10 ^a	26 ^b	14 ^{ab}	22.1	<0.001
Dorada	67 ^a	32 ^b	53 ^{ab}	42 ^b	29.2	<0.001
Oscura	11 ^a	26 ^b	14 ^{ab}	44 ^c	40.1	<0.001
Espumosa	40 ^{ab}	43 ^a	45 ^a	27 ^b	12.1	0.007

Superíndices diferentes indican diferencias significativas según análisis post-hoc de McNemar con ajuste Bonferroni ($p < 0.05$).

Tabla 33.

Subconjuntos homogéneos para descriptores de olor según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores ocasionales

Descriptor	Control	T1	T2	T3	Q de Cochran	Valor p
Levadura	47 ^a	32 ^b	25 ^b	30 ^{ab}	15.8	0.001
Jengibre	13 ^a	29 ^b	30 ^b	35 ^b	25.6	<0.001
Herbal	9 ^a	15 ^{ab}	24 ^b	19 ^{ab}	14.2	0.003
Malta	24 ^a	21 ^{ab}	12 ^b	24 ^{ab}	10.1	0.018
Floral	7 ^a	17 ^b	19 ^{ab}	12 ^{ab}	9.8	0.020
Frutal	23 ^a	15 ^a	31 ^b	14 ^a	18.3	<0.001

Superíndices diferentes indican diferencias significativas según análisis post-hoc de McNemar con ajuste Bonferroni ($p < 0.05$).

Tabla 34.

Subconjuntos homogéneos para descriptores de sabor según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores ocasionales

Descriptor	Control	T1	T2	T3	Q de Cochran	Valor p
Jengibre	15 ^a	38 ^b	41 ^b	42 ^b	45.6	<0.001
Dulce	37 ^a	10 ^b	28 ^b	16 ^b	37.2	<0.001
Amargo	39 ^a	57 ^b	30 ^a	42 ^{ab}	28.5	<0.001
Espicias	8 ^a	17 ^a	27 ^b	12 ^{ab}	22.7	<0.001
Picante	1 ^a	11 ^b	5 ^{ab}	11 ^b	18.3	<0.001

Superíndices diferentes indican diferencias significativas según análisis post-hoc de McNemar con ajuste Bonferroni ($p < 0.05$).

Tabla 35.

Subconjuntos homogéneos para descriptores de textura según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores ocasionales

Descriptor	Control	T1	T2	T3	Q de Cochran	Valor p
Cuerpo Ligero	58 ^a	33 ^b	37 ^b	41 ^b	28.1	<0.001
Cuerpo Medio	4 ^a	24 ^b	11 ^{ac}	16 ^{abc}	22.4	<0.001
Creмосa	5 ^a	25 ^b	11 ^{ab}	14 ^{ab}	21.6	<0.001
Picor	5 ^a	13 ^{ab}	20 ^b	16 ^b	16.3	0.001
Persistencia Térmica	0 ^a	10 ^b	6 ^{ab}	4 ^{ab}	12.5	0.006

Superíndices diferentes indican diferencias significativas según análisis post-hoc de McNemar con ajuste Bonferroni ($P < 0.05$).

Tabla 36.

Subconjuntos homogéneos para descriptores de retrogusto según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores ocasionales

Descriptor	Control	T1	T2	T3	Q de Cochran	Valor p
Frescor Cítrico	30 ^a	16 ^b	51 ^c	22 ^b	46.2	<0.001
Amargor Envolvente	35 ^a	55 ^b	27 ^a	45 ^{ab}	28.9	<0.001
Dulzor Residual	32 ^a	20 ^b	32 ^{ab}	20 ^b	12.8	0.005
Persistencia Picante	1 ^a	7 ^b	6 ^{ab}	11 ^b	12.2	0.007

Superíndices diferentes indican diferencias significativas según análisis post-hoc de McNemar con ajuste Bonferroni ($p < 0.05$).

E.2 Consumidores habituales (n = 100)

Tabla 37.

Subconjuntos homogéneos para descriptores de apariencia según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores habituales

Descriptor	Control	T1	T2	T3	Q de Cochran	Valor p
Turbia	6 ^a	12 ^a	9 ^a	30 ^b	30.11	<0.001
Cristalina	22 ^b	17 ^b	24 ^b	6 ^a	14.67	0.0029
Ámbar	33 ^a	43 ^b	30 ^a	25 ^a	8.73	0.0351
Oscura	25 ^b	7 ^a	13 ^a	26 ^b	16.85	<0.001
Espumosa	11 ^a	27 ^b	30 ^b	34 ^b	18.12	<0.001

Superíndices diferentes indican diferencias significativas según análisis post-hoc de McNemar con ajuste Bonferroni ($p < 0.05$).

Tabla 38.

Subconjuntos homogéneos para descriptores de olor según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores habituales

Descriptor	Control	T1	T2	T3	Q de Cochran	Valor p
Levadura	28 ^b	35 ^b	27 ^b	35 ^b	9.84	0.0213
Cítrico	14 ^a	19 ^{ab}	28 ^b	24 ^b	11.13	0.0116
Jengibre	10 ^a	17 ^{ab}	21 ^b	30 ^c	14.41	0.0032
Frutal	46 ^b	22 ^a	23 ^b	17 ^a	12.65	0.0056

Superíndices diferentes indican diferencias significativas según análisis post-hoc de McNemar con ajuste Bonferroni ($p < 0.05$).

Tabla 39.

Subconjuntos homogéneos para descriptores de sabor según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores habituales

Descriptor	Control	T1	T2	T3	Q de Cochran	Valor p
Picante	15 ^a	25 ^b	24 ^b	22 ^b	10.87	0.0136
Dulce	34 ^b	38 ^b	35 ^b	18 ^a	8.14	0.0447
Jengibre	14 ^a	30 ^b	29 ^b	35 ^b	14.19	0.0034

Superíndices diferentes indican diferencias significativas según análisis post-hoc de McNemar con ajuste Bonferroni ($p < 0.05$).

Tabla 40.

Subconjuntos homogéneos para descriptores de textura según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores habituales

Descriptor	Control	T1	T2	T3	Q de Cochran	Valor p
Carbonatación suave	18 ^a	26 ^{ab}	25 ^{ab}	37 ^b	12.51	0.0061
Carbonatación alta	21 ^{ab}	15 ^a	24 ^b	16 ^a	9.44	0.0243
Cuerpo medio	15 ^a	22 ^{ab}	33 ^b	25 ^{ab}	10.86	0.0136

Superíndices diferentes indican diferencias significativas según análisis post-hoc de McNemar con ajuste Bonferroni ($p < 0.05$).

Tabla 41.

Subconjuntos homogéneos para descriptores de retrogusto según pruebas post-hoc de McNemar con ajuste de Bonferroni – Consumidores habituales

Descriptor	Control	T1	T2	T3	Q de Cochran	Valor p
Frescor cítrico	23 ^a	20 ^a	32 ^{ab}	36 ^b	8.54	0.0382

Superíndices diferentes indican diferencias significativas según análisis post-hoc de McNemar con ajuste Bonferroni ($p < 0.05$).

ANEXO F. Evaluación hedónica detallada

Este anexo presenta los resultados completos de la evaluación hedónica por grupo de consumidores, incluyendo estadística descriptiva y análisis de varianza (sección 7.6.3).

Tabla 42.

Resultados de la evaluación hedónica para los diferentes tratamientos de cerveza con jengibre – Consumidores ocasionales

Tratamiento	Descripción	Puntuación media*
Control	0.0 g/L jengibre	6.50 ^a ± 0.43
T2	1.5 g/L jengibre	6.14 ^{ab} ± 0.51
T3	2.0 g/L jengibre	6.05 ^{ab} ± 0.47
T1	1.0 g/L jengibre	5.43 ^b ± 0.62

Valores expresados como media ± desviación estándar. Superíndices diferentes indican diferencias significativas (Tukey HSD, $p < 0.05$).

Tabla 43.

Resultados de la evaluación hedónica para los diferentes tratamientos de cerveza con jengibre – Consumidores habituales.

Tratamiento	Descripción	Puntuación media*
Control	0.0 g/L jengibre	6.42 ± 2.31
T3	2.0 g/L jengibre	6.67 ± 1.95
T1	1.0 g/L jengibre	6.23 ± 2.07
T2	1.5 g/L jengibre	6.01 ± 2.18

*Valores expresados como media ± desviación estándar. No existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p = 0.296$).