



Facultad de Ciencia y Tecnología

Escuela de Ingeniería en Alimentos

“Identificación de fuentes vegetales para potencial sustitución de lúpulo en
cervecería”

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

Ingeniera en Alimentos

Autor:

María Belén Reyes Hernández

Director:

Diego Patricio Suárez Estrella

Cuenca – Ecuador

2026

Dedicatoria

A mis padres, por darme la oportunidad de estudiar lejos de casa y permitirme seguir el camino que realmente quería, aun cuando eso implicaba muchos sacrificios. Gracias por la confianza y la libertad que me dieron para vivir sola y crecer como persona, pero siempre haciéndome sentir acompañada y sostenida por mi familia, incluso en la distancia.

Gracias por recordarme quién soy en los momentos en los que me sentía perdida o dudaba de mí misma, por hacerme sentir amada y segura cuando las cosas se volvían difíciles. Por creer siempre en mis capacidades y en mi potencial, impulsándome a buscar más y a confiar en lo que puedo lograr.

También les agradezco por la forma en la que me criaron: con un carácter fuerte y firme, pero también bondadoso y cercano. Gran parte de lo que soy y de lo que he conseguido hasta hoy se lo debo a ustedes y al apoyo que me han dado en cada etapa de mi vida.

Agradecimientos

A Dios, por guiarme en mi formación y cuidarme cada día, dándome esa “suerte increíble” que siempre siento que me acompaña en todo lo que hago.

A mis padres y a mis hermanos, por ser mi hogar, por acompañarme en cada etapa de este proceso y hacer que nunca me sienta sola.

A mi abuelo Mario por recordarnos siempre a mis hermanos y a mí que “somos brillantes y estamos destinados a futuros brillantes”, y regalarnos tantos libros para aportar a nuestra educación.

A toda mi familia, por llenarme de amor, preocuparse por mí a la distancia y enseñarme que todos los problemas se alivianan un poco con un almuerzo de domingo con comida deliciosa y muchas risas.

A mis amigas de Guayaquil, por ser unas hermanas y amores de mi vida; por ser incondicionales desde el primer momento, por ser refugio, impulso y consejo, y por haberme dado un lugar seguro donde descubrir la persona que quería ser.

A mis amigas de Cuenca, que me quisieron con mis defectos, pero también me ayudan constantemente a ser mejor. Aprendo de las diferencias que tengo con cada una, y el contraste de nuestras fortalezas nos complementa. Gracias por estar para mí en los períodos más estresantes de mi tesis y sacrificar sus horas libres para acompañarme y aliviar mis cargas.

Al Inge Diego Suárez, por ser un profesor excepcional, preocupado por mi educación y también por mi bienestar personal; por ser como un padre y un amigo. Gracias por la paciencia, el buen humor, el cariño y por haberme escogido para ser su tesista.

A todos mis profesores y laboratoristas, por compartir sus conocimientos con pasión y exigirme más de lo que creía posible, ayudándome a descubrir capacidades que no sabía que tenía. Gracias también por dejarse conocer más allá de lo académico, porque en ustedes encontré no solo figuras admirables, sino también ejemplos de las personas y profesionales que algún día espero llegar a ser.

Al departamento de Biología de la Universidad del Azuay, en especial al Blgo. Danilo Minga, por ayudarme en el reconocimiento y determinación de toxicidad de las plantas utilizadas en este estudio.

A Ezra, por ayudarme con los análisis fisicoquímicos de mi tesis. Estando contra el tiempo, su colaboración fue crucial y me permitió sacar adelante otras áreas del trabajo.

A la Università degli Studi di Milano, por realizar los análisis de nariz y lengua electrónica que aportaron significativamente al desarrollo de esta investigación.

Resumen:

El lúpulo es uno de los principales ingredientes en la elaboración de cerveza, debido a su aporte de amargor, aroma y estabilidad al producto final. Sin embargo, el interés por el aprovechamiento de recursos vegetales alternativos ha impulsado la búsqueda de especies con potencial para sustituir parcial o totalmente sus funciones tecnológicas y sensoriales. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar fuentes vegetales como posibles alternativas al uso del lúpulo en la elaboración de cerveza. Se seleccionaron 11 especies vegetales y se elaboraron muestras de cerveza. Se realizaron análisis sensoriales mediante prueba triangular con 28 panelistas, además de una evaluación de atributos diferenciadores, nivel de agrado y análisis instrumental mediante nariz y lengua electrónica. Se determinaron parámetros fisicoquímicos como sólidos solubles, pH, densidad, contenido de alcohol, acidez titulable y colorimetría. Los resultados sensoriales evidenciaron diferencias significativas entre las muestras elaboradas con recursos vegetales y la cerveza control con lúpulo, siendo el sabor el principal atributo responsable de la diferenciación. Especies como el matico y la cáscara de granadilla presentaron perfiles más cercanos al control en determinados análisis. A nivel fisicoquímico, todas las muestras se mantuvieron dentro de rangos compatibles, aunque se observaron variaciones asociadas a la composición de las especies vegetales utilizadas. El análisis instrumental permitió identificar similitudes parciales entre algunas plantas y el lúpulo, principalmente al integrar atributos aromáticos y gustativos. En conclusión, los resultados evidencian que ciertos recursos vegetales presentan potencial para aportar características de interés en cervecería, aunque ninguno logró replicar completamente el perfil del lúpulo.

Palabras clave: Análisis fisicoquímicos, análisis sensorial, cerveza, lúpulo, recursos vegetales.

Abstract:

Hop is one of the main ingredients used in beer production due to their contribution to bitterness, aroma, and stability to the final product. However, the growing interest in the use of alternative plant resources has driven the search for species with the potential to partially or completely replace hop's technological and sensory functions. The aim of the present study was to evaluate plant sources as possible alternatives to hops in beer brewing. For this purpose, 11 plant species were selected, and beer samples were produced. Sensory analyses were conducted triangular tests with 28 panelists, along with an evaluation of differentiating attributes, and instrumental analysis using an electronic nose and electronic tongue. Physicochemical parameters such as soluble solids, pH, density, alcohol content, titratable acidity, and colorimetry were determined. The sensory results showed significant differences between the samples produced with plant resources and the hop control beer, with flavor being the main attribute responsible for differentiation. Species such as matico leaf and granadilla peel showed profiles closer to the control in certain analyses. At the physicochemical level, all samples remained with compatible ranges, although variations associated with the composition of the plant species used were observed. Finally, instrumental analysis revealed partial similarities between some plants and hop, mainly in terms of aromatic and flavor attributes. In conclusion, the results demonstrate that certain plant resources have the potential to contribute characteristics of interest in brewing, although none fully replicated the hop profile.

Keywords: Physicochemical analysis, sensory analysis, beer, hop, plant resources.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Resumen.....	iii
Abstract.....	v
Capítulo 1.....	1
Introducción.....	1
1.1 Cebada.....	1
1.1.1 Morfología de la planta de cebada.....	1
1.1.2 Tipos de cebada	2
1.1.3 Composición nutricional.....	4
1.2 Elaboración de la cerveza.....	6
1.2.1 Definición	6
1.2.2 Ingredientes	7
1.2.3 Proceso de elaboración de la cerveza	8
1.3 Planta de lúpulo.....	10
1.3.1 Características morfológicas del lúpulo	10
1.3.2 Condiciones de crecimiento de la planta de lúpulo	11
1.3.3 Importación de lúpulo en Ecuador.....	12
1.3.4 Características químicas y sensoriales del lúpulo.....	12
1.3.5 Proceso de peletización del lúpulo	13
1.4 Antecedentes en estudios similares	15
1.4.1 Nacionales	15
1.4.2 Internacionales.....	16
1.5 Posibles sustitutos	17
Capítulo 2.....	19
Materiales y métodos	19
2.1 Materiales.....	19
2.2 Métodos.....	20
2.2.1 Procesamiento de las plantas	20
2.2.2 Pruebas preliminares.....	21
2.2.3. Nariz y lengua electrónica	22
2.2.4 Malteado	24
2.2.5 Elaboración de la cerveza	26

2.2.6 Análisis fisicoquímicos.....	29
2.2.7 Análisis sensorial.....	30
2.2.8. Análisis estadístico	32
Capítulo 3.....	34
Resultados y Discusiones.....	34
3.1. Pruebas Preliminares	34
3.2. Lengua y nariz electrónica	35
3.3 Análisis fisicoquímicos	38
3.4. Análisis Sensorial	43
Conclusiones.....	48
Referencias Bibliográficas.....	49
Anexos	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Recursos vegetales estudiados.	19
Tabla 3.1 Especies vegetales seleccionadas y proporciones para preparación de infusiones .	34
Tabla 3.2. Compuestos relevantes detectados por la nariz electrónica	37
Tabla 3.3. Sólidos solubles, densidad y contenido de alcohol de las cervezas	40
Tabla 3.4. Resultados de los análisis de pH, acidez y colorimetría de las cervezas.....	42
Tabla 3.5. Resultados de la prueba triangular para la diferenciación sensorial entre la cerveza control (lúpulo) y las cervezas elaboradas con plantas (n=28 panelistas)	44
Tabla 3.6. Atributos sensoriales asociados a la diferenciación entre las muestras según la percepción de los panelistas.....	45
Tabla 3.7. Nivel de agrado de las diferentes cervezas.....	47

ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 1.1. Espiga de cebada de 2 filas y de 6 filas.....	2
Figura 1.2. Cebada con cáscara y desnuda	3
Figura 2.1. Materias vegetales antes de ser molidas.....	21
Figura 2.2. Extractos de las muestras vegetales.....	22
Figura 2.3. Germinación de los granos de cebada	25
Figura 2.4. Tamizado de los granos germinados secos	26
Figura 2.5. Molienda de la malta	26
Figura 2.6. Recirculado después de la maceración.....	27
Figura 2.7. Inoculación de la levadura.....	28
Figura 2.8. Fermentación en recipientes sellados	28
Figura 2.9. Envasado en botellas	29
Figura 3.1. PCA de lengua electrónica	36
Figura 3.2. PCA de nariz electrónica	36
Figura 3.3. PCA de nariz y lengua electrónica combinadas	38

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Formulario de convocatoria y preselección.	55
Anexo 2. Ficha de entrenamiento y selección.	57
Anexo 3. Ficha de catas.	57
Anexo 4. Tabla de distribución binomial aplicada en el análisis de resultados sensoriales. ...	58

Capítulo 1

Introducción

1.1 Cebada

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) es un cereal de gran importancia agrícola y alimentaria a nivel mundial, perteneciente a la familia Poaceae, que se cultiva en una amplia variedad de climas templados y fríos (Kaur et al., 2024). En términos de producción global, la cebada ocupa el cuarto lugar en la producción mundial de cereales, alcanzando los 142 millones de toneladas en 2024, lo que refleja su importancia económica y agronómica (<https://www.fao.org/faostat/es/#compare>).

Desde el punto de vista nutricional, los granos de cebada contienen una combinación de almidones, proteínas, lípidos, fibras y compuestos bioactivos, entre los cuales los β -glucanos son de particular interés por sus efectos funcionales sobre la salud humana y sus aplicaciones tecnológicas en productos alimentarios (Kaur et al., 2024; Mubai et al., 2025).

1.1.1 Morfología de la planta de cebada

La cebada tiene un sistema de raíces fibroso, eficiente para absorber agua y nutrientes. Su forma y tamaño depende de la variedad de cebada y el tipo de suelo donde se cultive (Wang et al., 2021). Los tallos son rectos, divididos en secciones llamadas internudos, que sostienen las hojas y espigas. Desde la base de la planta suelen salir brotes laterales llamados macollos o tillers, que permiten que una planta forme más de un tallo y, por lo tanto, más espigas (Spanic et al., 2025). Las hojas son largas y estrechas, dispuestas a lo largo del tallo y su tamaño y forma puede cambiar entre variedades, lo que influye en la fotosíntesis y en cómo la planta aprovecha la luz del sol (Spanic et al., 2025).

En la punta del tallo se encuentra la espiga, donde se forman los granos. Cada espiga tiene pequeñas unidades llamadas espiguillas, que son las que contienen las flores y luego los granos. La cantidad de espiguillas fértiles determina el tipo de cebada: cuando hay dos filas, solo la espiguilla central de cada triplete produce grano, pero si hay seis filas, las tres espiguillas producen grano. Esto es importante porque afecta a la cantidad de granos que puede producir cada planta y cómo es aprovechado ese rendimiento en la industria (Spanic et al., 2025).

Cada espiguilla tiene unas brácteas protectoras que cubren las flores, y algunas variedades tienen aristas, que son como pequeños “pelos” largos que sobresalen de la espiga. La presencia o ausencia de estas aristas depende de la variedad y puede influir en el manejo de los granos poscosecha (Spanic et al., 2025).

El grano de cebada es un fruto seco llamado cariósipide, donde la semilla está pegada al pericarpo (la cubierta del fruto). Dentro del grano está el endospermo, rico en almidón, la capa de aleurona, que contiene proteínas y enzimas, y el embrión, que permitirá que la planta crezca a partir de la semilla (Spanic et al., 2025).

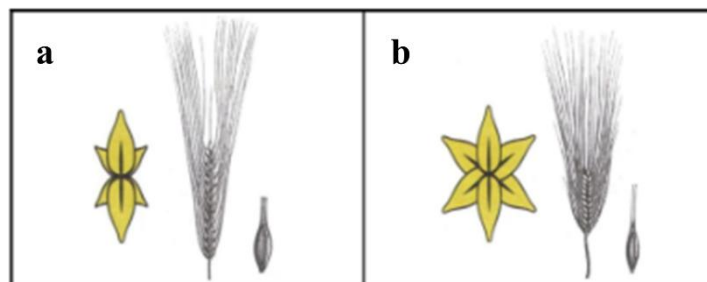
1.1.2 Tipos de cebada

Dos de las formas de clasificación de la cebada se basan en el número de filas de granos en la espiga y en la facilidad de desprendimiento de la cáscara adherida al grano. Estas diferencias no solo son útiles para describir las variedades, sino que además están asociadas con sus usos agronómicos y tecnológicos.

1.1.2.1 Cebada de dos y seis filas

En la cebada de dos filas (Figura 1.1a), solo la espiguilla central de cada conjunto triplete en el eje principal de la espiga es fértil, lo que produce dos filas de granos claramente visibles en la cabeza del cereal. En la de seis filas (Figura 1b), las tres espiguillas (central y dos laterales) son fértiles, resultando en una espiga con seis filas de granos cuando se observa desde todos los lados del raquis (Jeanty et al., 2023).

Figura 1.1. Espiga de cebada de 2 filas y de 6 filas.



Fuente: (Piotti, 2024).

Esta diferencia morfológica se debe en gran medida a variaciones en los genes que regulan la fertilidad de las espiguillas. Desde un punto de vista tecnológico, las cebadas de dos filas suelen presentar granos más uniformes y de mayor tamaño individual, lo cual históricamente ha sido preferido para la producción de malta cervecera (debido a un mayor contenido porcentual de almidón), mientras que las de seis filas pueden ser más productivas en rendimiento total por unidad de área (Jeanty et al., 2023).

1.1.2.2 Cebada con cáscara y cebada desnuda

Las variedades de cebada también se distinguen por la presencia o ausencia de cáscara después de la cosecha, es decir, por la facilidad con la que esta se desprende del grano. La cebada con cáscara (Figura 1.2a) es la más cultivada (Jeanty et al., 2023; Hagenblad et al., 2024). Por su parte, la cebada desnuda (Figura 1.2b) se destina preferentemente a aplicaciones alimentarias y procesos tecnológicos en los que se requiere una menor proporción de fibra estructural, ya que su procesamiento resulta más sencillo y eficiente en comparación con la cebada con cáscara, la cual es utilizada con mayor frecuencia en alimentación animal (Hagenblad et al., 2024).

Figura 1.2. Cebada con cáscara y desnuda.



Fuente: (Lukinac & Jukić, 2022).

En estudios filogenéticos y de caracterización, las cebadas desnudas pueden ser tanto de dos como de seis filas, lo que indica que la condición de desnudez no está necesariamente ligada a un patrón de espiga, sino que es una característica independiente que puede combinarse con ambos tipos de espigado (Jeanty et al., 2023).

La clasificación en dos o seis filas y en cubierta o desnuda tiene relevancia práctica, ya que permite seleccionar materiales con características deseables según el uso final. Para la industria cervecera y de alimentos, los distintos tipos de cebada se comportan de manera diferente en

procesos de malteado, molienda y fermentación, por lo que la elección de la variedad adecuada influye en la eficiencia del proceso y en la calidad del producto final (Jeanty et al., 2023).

1.1.3 Composición nutricional

El perfil nutricional de la cebada combina macronutrientes importantes para el desarrollo de procesos biológicos, así como compuestos funcionales de interés para aplicaciones industriales, especialmente en la elaboración de malta y de cerveza. Su composición cambia según la variedad genética, las condiciones de cultivo y el grado de procesamiento; sin embargo, se pueden englobar dentro de las siguientes categorías (Kaur et al., 2024; Mubai et al., 2025).

1.1.3.1 Proteínas

El contenido total de proteína en la cebada oscila entre el 8% y 16% del peso seco del grano. Esta proporción de proteína es importante porque afecta tanto el valor nutricional como la eficiencia del proceso de malteado y fermentación, dado que niveles de proteína muy altos pueden reducir la conversión de carbohidratos en azúcares fermentables, mientras que niveles muy bajos pueden comprometer la nutrición de la levadura durante la fermentación, ya que esta necesita el nitrógeno de los derivados proteicos para su crecimiento y funciones metabólicas (Kaur et al., 2024; Mo et al. 2013).

Las proteínas de la cebada se clasifican según su solubilidad y función biológica en albúminas y globulinas, solubles en agua y soluciones salinas, y en prolaminas y glutelinas, que constituyen las principales proteínas de reserva del grano. Dentro de esta fracción, las prolaminas (hordeínas), representan aproximadamente 40-50% del contenido proteico total, mientras que las glutelinas aportan alrededor de 35-45%. El porcentaje restante corresponde a albúminas y globulinas (Kaur et al., 2024).

1.1.3.2 Lípidos

Los lípidos constituyen una fracción menor del grano de cebada, representando típicamente entre 2-3% del peso total (Kaur et al., 2024). A pesar de su bajo porcentaje, los lípidos están concentrados en zonas funcionales del grano como el embrión y la capa de aleurona, donde

aportan ácidos grasos esenciales, fosfolípidos y tocoferoles (vitamina E), que son importantes desde una perspectiva nutricional y antioxidante (Mubai et al., 2025).

1.1.3.3 Fibra dietética y β -glucanos

La cebada se caracteriza por su alto contenido de fibra dietética, especialmente en forma de β -glucanos, que son polisacáridos solubles presentes en la pared celular del endospermo. Aunque la proporción de β -glucanos puede variar entre genotipos, en general estos compuestos representan una fracción significativa de los carbohidratos no digeribles, con beneficios para la salud humana como la mejora de la respuesta glucémica y la reducción del colesterol en la sangre (Mubai et al., 2025). El contenido de fibra total se encuentra entre 11-16% (Kaur et al., 2024). Los β -glucanos también tienen un impacto tecnológico importante en el procesamiento de la cebada, ya que interfieren en la viscosidad del mosto durante la etapa inicial de la elaboración de la cerveza, afectando la filtración y la eficiencia de extracción de azúcares durante el macerado (Mubai et al., 2025).

1.1.3.4 Minerales, vitaminas y compuestos bioactivos

Además de macronutrientes, la cebada aporta minerales esenciales como magnesio (527-616 ppm), calcio (312-368 ppm), sodio (122-146 ppm), hierro (43-66 ppm) y zinc (22.5-26.6 ppm), vitaminas del grupo B, vitamina E y K, así como compuestos bioactivos fenólicos (1.2-2.9 miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo (mg GAE/g)), que contribuyen a la actividad antioxidante del grano (Kaur et al., 2024; Mubai et al., 2025).

1.1.3.5 Almidón

El almidón es el principal carbohidrato de reserva en el grano de cebada, oscilando entre 65 % y 70 % del peso seco del grano (Kaur et al., 2024; Mubai et al., 2025). Este polisacárido está compuesto por dos tipos de moléculas de glucosa: amilosa (lineal), y amilopectina (ramificada), cuya proporción difiere según la variedad de cebada y afecta la textura y funcionalidad del almidón (Kaur et al., 2024).

Durante la germinación del grano, el almidón se hidroliza por la acción de enzimas amilolíticas, generando azúcares simples y maltosa, que sirven de alimento para las levaduras. Esta

propiedad es crucial para la industria cervecera, ya que la eficiencia en la liberación de azúcares fermentables determina directamente la producción de alcohol y el rendimiento de la fermentación (Mubai et al., 2025).

Además, la estructura del almidón influye en la viscosidad y filtración del mosto durante el macerado. Un contenido adecuado de almidón de buena calidad permite una conversión más completa en azúcares fermentables y contribuye a un perfil de sabor óptimo en la cerveza (Kaur et al., 2024).

1.2 Elaboración de la cerveza

1.2.1 Definición

La cerveza es una bebida alcohólica fermentada obtenida a partir de un mosto preparado principalmente con agua y cebada malteada, sola o en combinación con adjuntos cerveceros permitidos, al cual se añade lúpulo y/o sus derivados para aportar amargor y aroma característicos. Su producción implica una fermentación controlada mediante levaduras cerveceras seleccionadas, y el producto final no debe contener alcohol etílico obtenido por destilación, ya que su origen proviene exclusivamente de la fermentación de los azúcares presentes en el mosto (Servicio Ecuatoriano de Normalización [INEN], 2022).

De acuerdo con la norma NTE INEN 2262:2022, la cerveza debe cumplir un conjunto de características fisicoquímicas esenciales. Debe tener un contenido de alcohol etílico dentro de los rangos establecidos para las categorías de cerveza sin alcohol, de bajo, mediano o alto contenido alcohólico. El pH debe estar comprendido entre 2.8 y 5.0, con una acidez total no mayor al 1.70% expresada como ácido láctico. El contenido de dióxido de carbono debe ser entre 0.9 y 4.0 volúmenes de CO₂ y el extracto original debe ser acorde a la clasificación en cerveza liviana, cerveza o cerveza extra. Además, establece límites estrictos para contaminantes inorgánicos como hierro, cobre, zinc, arsénico y plomo, para asegurar la inocuidad y seguridad del producto final (INEN, 2022).

En cuanto a sus atributos sensoriales y de estabilidad, la cerveza no debe presentar turbidez ni sedimentación, salvo en ciertos estilos cuyas materias primas o procesos tradicionales lo justifiquen como una característica propia del producto. Asimismo, la cerveza pasteurizada o

microfiltrada debe cumplir con límites máximos de aerobios mesófilos y anaerobios, de acuerdo con los criterios microbiológicos establecidos por la norma ecuatoriana (INEN, 2022).

1.2.2 Ingredientes

El perfil de una cerveza está determinado fundamentalmente por cuatro ingredientes: agua, cebada malteada, lúpulo y levadura (Thesseling et al., 2019; Postigo et al., 2024). Estos ingredientes no solo aportan los componentes base de la cerveza, sino que también influyen directamente en sus atributos sensoriales, la eficiencia del proceso de elaboración y la calidad microbiológica del producto final.

1.2.2.1 Agua

El agua constituye la mayor parte del volumen de la cerveza, que representa entre el 85% y 95% del producto final (Postigo et al., 2024; Wasmuht, 2023). La composición química del agua, incluyendo minerales como calcio, magnesio, sulfatos y cloruros, influye en la solubilidad de compuestos, en la extracción de azúcares durante el macerado y en aspectos sensoriales como el sabor y la sensación en boca. Es indispensable que el agua utilizada sea potable y libre de contaminantes que afectan directamente en la calidad de la cerveza (Postigo et al., 2024; Wasmuht, 2023).

1.2.2.2 Cebada malteada

Es la principal fuente de carbohidratos fermentables en la cerveza. La malta se obtiene mediante un proceso en el cual los granos de cebada germinan controladamente para activar las enzimas α -amilasa y β -amilasa, que permitirán la conversión de almidón en azúcares durante el macerado (Thesseling et al., 2019; Postigo et al., 2024).

Además de cebada, otros cereales malteados como trigo, centeno, avena o arroz pueden incorporarse en distintas proporciones, aportando variaciones en cuerpo, espuma y perfil sensorial (Wasmuht, 2023). Sin embargo, para las cervezas tradicionales, la cebada malteada constituye la base estructural del mosto cervecero (Thesseling et al., 2019).

1.2.2.3 Lúpulo

El lúpulo (*Humulus lupulus*) se utiliza principalmente por sus propiedades aromáticas, amargantes y conservantes naturales. Los compuestos amargos del lúpulo equilibran el sabor que aportan los azúcares de la malta, mientras que los aceites esenciales y otros compuestos volátiles contribuyen a los aromas florales, cítricos, herbales o resinosos que caracterizan distintos estilos cerveceros (Thesseling et al., 2019; Postigo et al., 2024). Además, los ácidos del lúpulo ofrecen cierta actividad antimicrobiana, favoreciendo la estabilidad del producto final (Thesseling et al., 2019).

1.2.2.4 Levadura

La levadura es un microorganismo unicelular esencial en la fermentación, responsable de convertir los azúcares presentes en el mosto en etanol y dióxido de carbono, además de producir compuestos secundarios que afectan el sabor, aroma y cuerpo de la cerveza (Postigo et al., 2024; Thesseling et al., 2019). Las especies cerveceras más utilizadas son *Saccharomyces cerevisiae* (levadura de fermentación alta) y *Saccharomyces pastorianus* (levadura de fermentación baja), cada una asociada con perfiles sensoriales y procesos fermentativos diferentes (Postigo et al., 2024).

1.2.3 Proceso de elaboración de la cerveza

1.2.3.1 Malteado

Transforma el grano crudo de cebada en malta, mediante una serie de procesos bioquímicos que activan y desarrollan las enzimas necesarias para la conversión del almidón durante la maceración. El malteado incluye tres etapas controladas: remojo, germinación y secado, cuyos parámetros determinan la actividad enzimática, la degradación de las paredes celulares, el desarrollo de componentes aromáticos y el color característico del grano (Briggs et al., 2004b; Kunze, 2014).

En la etapa de remojo, los granos se hidratan por inmersión en agua hasta alcanzar aproximadamente 42-48 % de humedad, lo cual permite el inicio de la actividad metabólica del embrión y la activación de enzimas hidrolíticas preexistentes (Briggs et al., 2004b).

La germinación se lleva a cabo entre 12-20 °C, con una humedad relativa alta (>90%). En esta fase se activan las enzimas α -amilasa y β -amilasa, necesarias para la ruptura del almidón en azúcares durante la maceración. Físicamente, la germinación genera la aparición de radículas y el ablandamiento progresivo del endospermo, fundamental para asegurar una molienda adecuada y una extracción eficiente en las etapas posteriores (Kunze, 2014).

Finalmente, el secado y tostado detienen la germinación y reducen la humedad del grano hasta valores inferiores al 5-6%, facilitando su almacenamiento. El secado se realiza a temperatura moderada de 40-45°C, para preservar la actividad enzimática. Luego, en el tostado, a temperaturas más altas, se dan reacciones de Maillard y la formación de compuestos responsables del aroma, sabor y color característicos de la malta. La intensidad térmica de esta fase define el tipo de malta obtenida: maltas base, con temperaturas de tostado más bajas, mantienen una elevada actividad enzimática, mientras que las maltas especiales presentan mayor aporte de color y aromas tostados (Briggs et al., 2004b).

1.2.3.2 Maceración

El grano malteado se muele ligeramente, puesto que se busca romper su estructura externa y exponer el endospermo, facilitando así la liberación de almidones y proteínas durante las etapas posteriores (Kunze, 2014). Se mezcla con agua caliente en un rango óptimo de 62-65°C y se deja en reposo por 1 hora. Aquí, las enzimas del grano transforman el almidón en azúcares fermentables que serán utilizados por la levadura durante la fermentación (Kunze, 2014; Pahl et al., 2016). Luego de la maceración, se separa el mosto líquido del bagazo, y se lleva a cocción. El mosto se hierve por 1 hora para esterilizarlo, detener la actividad enzimática y precipitar las proteínas. En este paso se añade el lúpulo, cuyos ácidos se isomerizan generando el amargor característico de la cerveza. El mosto debe enfriarse a 20-22°C antes de la fermentación (Kunze, 2014; Pahl et al., 2016; Thesseling et al., 2019).

1.2.3.3 Fermentación

En esta etapa la levadura transforma los azúcares presentes en etanol y dióxido de carbono (Pahl et al., 2016). Cuando el mosto llega a la temperatura óptima, se inocula con la levadura (Kunze, 2014). Las cervezas ale, elaboradas con *Saccharomyces cerevisiae*, fermentan usualmente entre 18-22°C, generando perfiles más afrutados y complejos, mientras que las

cervezas lager, producidas con *Saccharomyces pastorianus*, fermentan a temperaturas más bajas, entre 8-12°C, resultando en cervezas más limpias y de carácter suave (Thesseling et al., 2019). La temperatura de fermentación es uno de los factores más importantes, ya que regula tanto la velocidad del proceso como la formación de compuestos aromáticos. Al finalizar, gran parte de la levadura sedimenta, permitiendo clarificar la cerveza antes de pasar a la etapa de maduración (Loviso & Libkind, 2019).

1.2.3.4 Maduración y Envasado

En los procesos industriales, esta etapa suele realizarse en tanques cerrados y refrigerados, donde la cerveza se mantiene entre 0 y 4 °C para permitir que la levadura remanente continúe removiendo compuestos indeseables como el diacetilo y el acetaldehído, mientras las proteínas y otras partículas se sedimentan, generando una bebida más limpia y estable (Kunze, 2014; Pahl et al., 2016). Este acondicionamiento también facilita el ajuste de la carbonatación mediante la incorporación controlada de CO₂ y se realiza antes del envasado para obtener un producto sensorialmente equilibrado. Sin embargo, en escalas pequeñas, la maduración ocurre directamente en las botellas, práctica que permite lograr la carbonatación por acción de la levadura residual y prolongar el contacto con los compuestos que continúan transformándose lentamente durante el almacenamiento (Thesseling et al., 2019). En ambos casos, el envasado debe realizarse con estricto control higiénico y mínima entrada de oxígeno, ya que la oxidación afecta el sabor, el color y la vida útil de la cerveza (Klimczak et al., 2024).

1.3 Planta de lúpulo

1.3.1 Características morfológicas del lúpulo

El lúpulo (*Humulus lupulus* L.) es una planta trepadora perenne perteneciente a la familia Cannabaceae y se cultiva principalmente por sus flores femeninas, conocidas como conos o estróbilos, que constituyen la materia prima utilizada en la elaboración de cerveza (Carbone & Gervasi, 2022). La planta crece a partir de un rizoma subterráneo (una estructura que funciona como órgano de reserva y permite su rebrote cada año) del cual emergen tallos flexibles que pueden alcanzar entre 6 y 10 metros de longitud (USDA ARS, 2020; Carbone & Gervasi, 2022).

Dichos tallos presentan hojas lobuladas, usualmente con tres a cinco lóbulos y borde serrado. Los conos están formados por varias capas de brácteas, estructuras delgadas que protegen las glándulas de lupulina, las cuales secretan una mezcla resinosa y oleosa en la que se concentran los ácidos amargos y los aceites esenciales que aportan amargor, aroma y propiedades de estabilidad a la cerveza (Campos et al., 2023; Kondić et al., 2021). La cantidad y distribución de estas glándulas dependen de la variedad y las condiciones de cultivo, lo que explica por qué los perfiles químicos pueden variar entre regiones productoras (Carbone & Gervasi, 2022).

1.3.2 Condiciones de crecimiento de la planta de lúpulo

El lúpulo es una planta originaria de regiones templadas del hemisferio norte y, por ello, presenta requerimientos ambientales específicos para su desarrollo óptimo, los cuales limitan su cultivo en latitudes cercanas al ecuador (Acosta-Rangel et al., 2024; Leles et al., 2025). Un factor climático clave para el cultivo de lúpulo es el fotoperiodo (duración del día). Esta especie requiere días largos, superiores a aproximadamente 15-16 horas de luz, para desarrollar adecuadamente su fase vegetativa, ya que este estímulo lumínico favorece el crecimiento de los tallos y la formación posterior de inflorescencias. Por esta razón, las principales regiones productoras de lúpulo se concentran entre las latitudes de 35° y 55° norte o sur, donde los ciclos estacionales de luz y oscuridad proporcionan las condiciones que la planta necesita para su crecimiento y transición hacia la floración (Leles et al., 2025).

Las condiciones ambientales típicas de Ecuador se caracterizan por fotoperiodos prácticamente constantes (cerca de 12 horas de luz al día) sin estaciones marcadas que ayuden a una fase de enfriamiento y floración adecuada de la planta (Leles, 2025). Estas características, propias de países cercanos al ecuador, no generan el fotoperiodo largo ni las variaciones térmicas estacionales que el cultivo de lúpulo necesita (Acosta-Rangel et al., 2024; Leles et al., 2025). Asimismo, la presencia de climas tropicales o ecuatoriales con variabilidad alta de humedad y temperatura puede limitar el desarrollo vegetativo y reproductivo de *Humulus lupulus* bajo condiciones de campo sin manejo ambiental controlado (Rossini et al., 2021). Por estas razones, a pesar de la fertilidad de los suelos y la diversidad climática presente en varias regiones del país, sus condiciones generales no coinciden con los parámetros óptimos requeridos para la producción comercial de lúpulo, lo que obliga a las cervecerías nacionales a depender de la importación de esta materia prima (Acosta-Rangel et al., 2024; Rossini et al., 2021).

1.3.3 Importación de lúpulo en Ecuador

De acuerdo con los datos del *World Integrated Trade Solution* (WITS), basados en la base estadística UN Comtrade, en 2023 el país registró aproximadamente 1.13 millones de dólares en importaciones de lúpulo (World Bank, 2023). En general, los insumos cerveceros utilizados en el país, incluido el lúpulo, se adquieren principalmente de Alemania, Bélgica, Reino Unido y algunos países de Latinoamérica (Ordóñez, 2020). Esta dependencia externa se combina con la imposibilidad de cultivar lúpulo en condiciones locales y justifican la necesidad de evaluar la viabilidad de utilizar alternativas vegetales que sí puedan ser cultivadas a nivel nacional.

1.3.4 Características químicas y sensoriales del lúpulo

El lúpulo (*Humulus lupulus* L.) es valorado principalmente por su composición química compleja, la cual genera las propiedades sensoriales clave que se buscan en la elaboración de cerveza: amargor, aroma y estabilidad. Estos compuestos se concentran en los conos femeninos y provienen de tres grupos principales: ácidos amargos, aceites esenciales volátiles y polifenoles (Roberts, 2016).

1.3.4.1 Ácidos alfa y beta

Los ácidos alfa representan los compuestos más relevantes desde el punto de vista del amargor. Entre ellos destacan la humulona, cohumulona y adhumulona, cuya concentración cambia considerablemente entre las variedades de lúpulo. Durante el hervor del mosto, estos ácidos sufren un proceso de isomerización térmica, transformándose en iso- α -ácidos, responsables del amargor estable y limpio característico de la cerveza. La eficiencia de esta conversión depende de factores como el tiempo de hervor, el pH y la forma del lúpulo utilizada (pellets o extracto), lo que explica por qué variedades con un mismo contenido de α -ácidos pueden producir intensidades de amargor diferentes (Roberts, 2016).

Los ácidos beta o lupulonas presentan menor solubilidad y contribuyen menos al amargor percibido; sin embargo, sus productos de oxidación pueden influir en la estabilidad del amargor a largo plazo y aportar compuestos con actividad antimicrobiana que favorecen la conservación natural de la cerveza. Aunque su impacto sensorial es menos directo que el de los ácidos alfa,

forman parte esencial del equilibrio químico del lúpulo como insumo cervecero (Roberts, 2016).

1.3.4.2 Aceites esenciales

Los aceites esenciales volátiles constituyen el grupo químico más importante en términos de aporte aromático. Su composición incluye una amplia variedad de terpenos, alcoholes, ésteres y sesquiterpenos (Roberts, 2016). Entre los compuestos dominantes se encuentran el mircenoleno, que aporta notas herbales y resinosas; el humuleno, asociado a aromas especiados y amaderados; el cariofileno, que confiere matices más secos o terrosos; y el farneseno, presente en variedades con perfiles florales delicados (de Smidt et al., 2025). La volatilidad de estos componentes hace que su aporte sensorial dependa no solo de la variedad, sino también del momento de adición durante el proceso cervecero. Cuando el lúpulo se añade en etapas finales del hervor o durante la fermentación, parte de estos aceites se preserva, generando perfiles aromáticos más intensos y complejos (Roberts, 2016).

1.3.4.3 Polifenoles

El lúpulo contiene además una variedad de polifenoles que influyen en la calidad sensorial y la estabilidad de la cerveza. Aunque se encuentran en menor concentración que los ácidos y aceites, sus efectos son significativos: contribuyen a la astringencia suave, participan en la estabilidad del color, y refuerzan la retención de espuma, un atributo valorado en la evaluación sensorial. Desde el punto de vista funcional, estos compuestos presentan actividad antioxidante, capaz de retardar procesos de oxidación que deterioran el sabor y aroma del producto. Adicionalmente, la interacción entre polifenoles y proteínas del mosto puede influir en la claridad y estabilidad coloidal, aspectos también señalados en investigaciones que analizan su rol en la calidad cervecera (Roberts, 2016).

1.3.5 Proceso de peletización del lúpulo

En la industria del lúpulo, la peletización permite concentrar, estabilizar y facilitar la manipulación del lúpulo seco, conservando al mismo tiempo los compuestos que aportan amargor y aroma a la cerveza. De acuerdo con Roberts (2016), la peletización industrial del

lúpulo permite obtener tres tipos principales de productos: los pellets estándar o Type 90 (T90), los pellets concentrados o Type 45 (T45) y los isopellets o pellets pre-isomerizados.

Los pellets T90 son los más utilizados comercialmente. El material vegetal seco pasa por un molino de martillos, donde se reduce a un polvo homogéneo que es comprimido a través de una matriz de aproximadamente 6 mm para formar los pellets, que mantienen una composición muy similar a los conos enteros y suelen emplearse como sustituto directo en diferentes etapas del proceso cervecero (Roberts, 2016).

Al elaborar los pellets T45, se separa la fracción de lupulina (rica en resinas y aceites esenciales) de la fracción de hoja. Se ajusta la manejabilidad del producto y se estandariza la concentración de α -ácidos. Este tipo de pellet ofrece un menor peso y volumen, reducción de residuos químicos y metales pesados asociados al tejido vegetal, y una composición más uniforme entre cosechas (Roberts, 2016).

Para los pellets pre-isomerizados o isopellets se incorpora una pequeña cantidad de óxido de magnesio a la mezcla molida, favoreciendo la conversión de los α -ácidos en iso- α -ácidos durante una etapa de acondicionamiento entre 45 y 55 °C por 8 a 14 días. Este proceso mejora notablemente la eficiencia de utilización de los compuestos de amargor (Roberts, 2016).

La calidad del pellet de lúpulo depende tanto del proceso de elaboración como de las condiciones de conservación posteriores. El envasado en bolsas laminadas debe evitar la entrada de oxígeno, ya que la oxidación provoca la degradación de α -ácidos y aceites esenciales. Desde el punto de vista físico, los pellets deben presentar tamaño uniforme, superficie lisa y color verde oliva, características que indican un procesamiento adecuado y ausencia de sobrecalentamiento durante la compresión. Asimismo, el contenido de humedad debe mantenerse por debajo del 10 % para prevenir procesos de degradación, mientras que la concentración de α -ácidos, iso- α -ácidos y aceites esenciales se determina mediante métodos analíticos estandarizados empleados en la industria cervecera (Roberts, 2016).

1.4 Antecedentes en estudios similares

Diversos trabajos académicos y tesis muestran que la sustitución parcial del lúpulo por ingredientes vegetales locales o por subproductos botánicos es una línea de investigación activa y viable en la cervecería artesanal.

1.4.1 Nacionales

Zeas (2021), de la Universidad Agraria del Ecuador, en la ciudad de Milagro, evaluó la sustitución parcial de la malta por lenteja (*Lens culinaris*) y del lúpulo por hierbabuena (*Mentha spicata*) en una cerveza tipo Ale. El trabajo, realizado a escala de laboratorio, comparó formulaciones con diferentes proporciones de lenteja y adiciones de hierbabuena. Se midieron parámetros fisicoquímicos y aceptación sensorial. Los resultados reportaron que la lenteja aporta sólidos y proteínas que afectan al cuerpo y la espuma, mientras que la hierbabuena contribuye con notas aromáticas herbales; las formulaciones con sustituciones parciales alcanzaron valores fisicoquímicos dentro de rangos aceptables y una aceptación sensorial entre moderada y buena, aunque con diferencias en claridad y perfil aromático respecto al testigo (Zeas, 2021).

En la Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Romero et al. (2023) estudiaron la sustitución parcial del lúpulo por semillas de cáñamo (*Cannabis sativa ssp. sativa*) en una cerveza Brown Ale y evaluaron cinco tratamientos con distintas proporciones lúpulo-semilla. En su trabajo midieron parámetros fisicoquímicos (pH, acidez, densidad, grados alcohólicos y capacidad antioxidante) así como microbiológicos. Sus resultados indican que las semillas de cáñamo pueden aportar aromas y cierto amargor residual, y que sustituciones moderadas de lúpulo (no totales) permiten obtener cervezas con aceptabilidad sensorial comparable al control, aunque con cambios perceptibles en aroma y color. Los autores subrayan la necesidad de controlar la oxidación y posibles notas vegetales no deseadas cuando se usan concentraciones altas (Romero et al., 2023).

Una investigación desarrollada en la Universidad de Cuenca por Rojas (2023) abordó el reemplazo del lúpulo por una mezcla de hierbas aromáticas (cedrón, hierba luisa y manzanilla) en una cerveza tipo Pale Ale. El estudio incluyó la caracterización química de las hierbas, la elaboración de cervezas piloto y la evaluación sensorial. El trabajo muestra que ciertas mezclas

herbales pueden reproducir parte del perfil aromático del lúpulo (especialmente las notas cítricas y florales) y que, con formulaciones adecuadas, la cerveza resultante obtiene una buena aceptabilidad por paneles entrenados. No obstante, también se observó una mayor turbidez y la necesidad de realizar ajustes en el proceso de filtración. Los autores concluyeron que la sustitución parcial es viable siempre que se optimice la dosificación y técnica de incorporación (Rojas, 2023).

1.4.2 Internacionales

En contextos distintos al de cebada y cerveza de malta, Adenuga et al. (2010), en la *Lagos State University of Science and Technology* de Nigeria, trabajaron con cerveza de sorgo e investigaron la utilización de hojas amargas (*Gongronema latifolium*, *Vernonia amygdalina*) y extractos de *Garcinia kola* como sustitutos del lúpulo. El estudio mostró que estos extractos pueden modular el amargor y el perfil sensorial del producto tradicional, y que algunas formulaciones fueron aceptables en pruebas sensoriales; sin embargo, la matriz de sorgo y las técnicas locales condicionan la transferencia de compuestos y la estabilidad, por lo que los autores recomiendan optimizar la extracción y dosificación para evitar sabores excesivamente amargos o astringentes (Adenuga et al., 2010).

En la *Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac*, de Perú, Otero (2010) desarrolló una investigación orientada a evaluar la sustitución parcial del lúpulo por harina de coca (*Erythroxylum coca*) en la elaboración de una cerveza tipo Ale, empleando además una cepa nativa de *Saccharomyces sp.* El estudio se llevó a cabo a escala experimental y analizó el impacto de dicha sustitución sobre parámetros fisicoquímicos, fermentativos y sensoriales del producto final. Los resultados mostraron que la incorporación de harina de coca influyó de manera significativa en el color, el perfil de amargor y las características sensoriales de la cerveza, generando notas vegetales distintivas respecto a la formulación control. Se evidenció que niveles moderados de sustitución permitieron obtener un producto técnicamente viable, aunque con diferencias sensoriales claramente perceptibles. El autor destaca la necesidad de un control riguroso de la dosificación y del tratamiento térmico, así como la consideración de aspectos regulatorios y de seguridad asociados al uso de esta materia prima vegetal en bebidas fermentadas (Otero, 2010).

Torres & Bohórquez (2017) evaluaron la sustitución parcial del lúpulo por cedrón (*Aloysia citrodora*), en la Universidad de La Salle, Bogotá. En esa investigación se observó que el cedrón aporta notas cítricas y herbales apreciables y que sustituciones menores permiten mantener perfiles sensoriales favorables, siempre que se ajuste la dosificación y el punto de adición para preservar compuestos volátiles (Torres & Bohórquez, 2017).

En *Acadia University*, Canadá, Hayward et al. (2019) realizaron una investigación orientada a la aceptabilidad sensorial, en la que elaboraron cervezas sustituyendo el lúpulo por diente de león, ortiga y salvia. Mediante pruebas sensoriales encontraron que, dependiendo de la concentración y del estilo, algunas combinaciones alcanzaron buena aceptación, mientras otras resultaron con percepciones de astringencia y sabores herbales muy marcados. Su trabajo utiliza metodologías sensoriales robustas y discute la importancia de la familiaridad del consumidor ante sabores no convencionales (Hayward et al., 2019).

1.5 Posibles sustitutos

El lúpulo aporta a la cerveza características sensoriales clave, principalmente relacionadas con el amargor y el aroma. Dado que los compuestos responsables de estas propiedades son específicos de la especie *Humulus lupulus*, en esta investigación la sustitución del lúpulo no busca replicar exactamente su composición química, sino explorar materias primas vegetales capaces de conferir sensaciones sensoriales agradables y compatibles con el perfil cervecero, particularmente en términos de amargor y complejidad aromática (Calvo, 2020).

Se consideran como alternativas plantas que, aun presentando perfiles químicos distintos, han sido tradicionalmente empleadas en bebidas o preparaciones infusionadas y que contienen compuestos volátiles capaces de aportar notas herbales, florales, cítricas, amaderadas o balsámicas, así como distintos niveles de amargor. Estos atributos sensoriales resultan relevantes en la elaboración de cerveza artesanal, donde el aroma y el sabor constituyen factores determinantes en la aceptación del producto (Suárez, 2013; de Smidt et al., 2025).

Debe considerarse que algunos metabolitos presentes en plantas aromáticas, en especial los aceites esenciales, pueden generar efectos adversos cuando se emplean en concentraciones elevadas. Sin embargo, diversas evaluaciones científicas y regulatorias indican que su utilización en dosis bajas y controladas, dentro de matrices alimentarias como bebidas

fermentadas, se considera segura cuando se respeta el uso tradicional y se aplican criterios tecnológicos adecuados (Bennett & Wallsgrove, 2020).

Con base en estos criterios, el presente estudio selecciona especies vegetales atendiendo principalmente a su aporte sensorial potencial y a su uso tradicional, en lugar de la similitud química con el lúpulo. Entre las plantas consideradas se incluyen: guayusa, ishpingo, guaviduca, rúcula, guayaba, chilca, cedrón, matico, granadilla y diente de león. Estas especies contienen compuestos asociados a perfiles herbales, florales, frutales, amaderados o balsámicos, así como distintos grados de amargor y astringencia, muy relevantes en la elaboración de cerveza.

Capítulo 2

Materiales y métodos

2.1 Materiales

La cebada utilizada (*Hordeum vulgare L*, var. Rita) se adquirió a la Asociación de Productores de Semillas y Alimentos Nutricionales “Mushuk Yuyay” (APROSANAMY) de la provincia de Cañar, Ecuador.

El tratamiento de desinfección de la cebada se realizó con una dilución de hipoclorito de sodio al 3% a partir del producto comercial Clorox (5.24%), comprado en supermercados locales (Supermaxi, Cuenca, Ecuador). Para esta solución se utilizó agua destilada obtenida de los laboratorios de Química de la Universidad del Azuay (UDA).

Para la elaboración de todas las cervezas se empleó levadura Safale US-05, lúpulo Cascade (Beerland: 6.3% A.A), agua potable, y azúcar blanca refinada (San Carlos, La Troncal, Ecuador).

Los recursos vegetales empleados en el estudio se encuentran detallados en la tabla 2.1. Estos fueron adquiridos principalmente en el Mercado “El Arenal” de la ciudad de Cuenca, así como también en supermercados y tiendas locales. Para su desinfección se aplicó el producto Star-Bac Domestic (Supermaxi, Cuenca, Ecuador) cuyo principio activo es el cloruro de benzalconio, apto para ser aplicado en alimentos.

Tabla 2.1. Recursos vegetales estudiados.

Elemento	Nombre científico	Parte utilizada
Naranja amarga	<i>Citrus aurantiaca (L.) Swingle</i>	Cáscara
Maracuyá	<i>Passiflora edulis f. flavicarpa Degener</i>	Cáscara
Geranio	<i>Pelargonium ×hortorum L.H.Bailey</i>	Hoja
Cilantro	<i>Coriandrum sativum L.</i>	Semilla
Matico	<i>Piper aduncum L.</i>	Hoja
Menta	<i>Mentha pulegium L.</i>	Hoja

Jengibre	<i>Zingiber officinale Roscoe</i>	Raíz
Manzanilla	<i>Matricaria chamomilla L.</i>	Flor
Diente de león	<i>Taraxacum officinale Weber ex F.H.Wigg.</i>	Raíz
Granadilla	<i>Passiflora ligularis Juss.</i>	Cáscara
Guaviduca	<i>Piper carpunya Ruiz & Pav.</i>	Hoja
Guayaba	<i>Psidium guajava L.</i>	Cáscara y hoja
Espinaca	<i>Spinacia oleracea L.</i>	Hoja
Acelga	<i>Beta vulgaris var. cicla L.</i>	Hoja
Nabo	<i>Brassica rapa subsp. Rapa</i>	Hoja
Rúcula	<i>Eruca vesicaria (L.) Cav.</i>	Hoja
Guayusa	<i>Ilex guayusa Loes.</i>	Hoja
Chilca	<i>Baccharis latifolia (Ruiz & Pav.) Pers.</i>	Hoja
Cedrón	<i>Aloysia citrodora Paláu</i>	Hoja
Ishpingo	<i>Ocotea quixos (Lam.) Kosterm. ex O.C.Schmidt</i>	Flor
Ortiga	<i>Urtica dioica L.</i>	Hoja
Té verde	<i>Camellia sinensis (L.) Kuntze</i>	Hoja

Estas muestras fueron comparadas con los lúpulos Cascade (Beerland: 6.3% A.A) y Citra (Beerland: 13% A.A).

2.2 Métodos

2.2.1 Procesamiento de las plantas

Los recursos vegetales fueron sometidos inicialmente a un proceso de selección manual. En el caso de las especies herbáceas, se realizó una clasificación para descartar material deteriorado, contaminado o con defectos visibles, además de separar tallos y otras partes no deseadas, conservando únicamente las hojas sanas. Para los materiales como frutas y especias, se efectuó el acondicionamiento correspondiente: las cáscaras fueron separadas de la pulpa y cortadas en fragmentos de menor tamaño; el ishpingo, comercializado en estado seco, se utilizó en esa misma condición; las raíces de diente de león fueron separadas del tallo.

Estos materiales fueron lavados con agua potable a fin de eliminar residuos, polvo e insectos; en este paso las raíces de diente de león se cepillaron cuidadosamente hasta eliminar su capa superficial que contiene tierra adherida. La desinfección se realizó mediante inmersión en una solución acuosa del producto comercial Star-Bac Domestic, preparada según las indicaciones del fabricante: una tapa del producto (6 mL) en 3 L de agua, manteniendo el contacto durante 5 minutos. Finalizado este tiempo, el material fue escurrido para eliminar el exceso de solución.

Una vez desinfectadas, las muestras se pasaron a un secador (Tecnopast, Trento, Italia) a 37°C durante 48 horas (Žbik et al., 2023). Luego, el material seco fue molido (Hamilton Beach, 80350R, Waterfront, Virginia, Estados Unidos) y almacenado a 4°C en bolsas herméticas Ziploc, debidamente etiquetadas para su posterior uso.



Figura 2.1. Materias vegetales antes de ser molidas.

Fuente: Propia

2.2.2 Pruebas preliminares

Se realizaron pruebas preliminares orientadas a evaluar sensorialmente los extractos vegetales, identificar aquellos con mayor potencial de uso y en qué etapas del proceso cervecero podrían incorporarse.

Se emplearon 3 métodos de evaluación para realizar la preselección de muestras. El primero consistió en infundir las especies en agua por 5 minutos y descartar los perfiles aromáticos y de sabor desagradables y que se identifiquen como claramente diferentes al lúpulo. En el segundo método se comparó una cerveza de referencia elaborada en los laboratorios de la Universidad del Azuay, con lúpulo, y otras elaboradas de la misma manera, pero sin lúpulo, a las que se añadieron infusiones de las distintas especies vegetales, una vez concluido el período de maduración. La cantidad de infusión incorporada varió de acuerdo a la planta, para aproximarse a una intensidad de amargor comparable a la cerveza con lúpulo. Además, se evaluó si los perfiles sensoriales se integraban adecuadamente en la matriz cervecera. Por último, con las muestras más prometedoras, se realizaron ensayos sin lúpulo, en los que, las infusiones de las especies vegetales, se añadieron a las botellas de cerveza antes de la maduración, para analizar si los sabores y aromas se afinaban en el producto final.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la etapa preliminar, para la elaboración de las cervezas destinadas al análisis sensorial y fisicoquímico, se prepararon infusiones acuosas de cada una de las especies vegetales (Figura 2.2), sometiéndolas a hervor durante 5 minutos. En el caso del lúpulo, se llevó a ebullición durante 1 hora con el fin de simular la extracción que normalmente ocurre durante la cocción del mosto, favoreciendo la isomerización de sus ácidos amargos y la liberación de compuestos aromáticos. Tras su preparación, se filtraron las infusiones de todas las muestras, incluido el lúpulo.



Figura 2.2. Extractos de las muestras vegetales

Fuente: Propia.

2.2.3. Nariz y lengua electrónica

Con el fin de complementar la evaluación sensorial y obtener una caracterización instrumental de los perfiles aromáticos y gustativos de las muestras, se realizaron análisis mediante sistemas

de nariz electrónica y lengua electrónica. Estos ensayos fueron llevados a cabo en la *Università degli Studi di Milano*, en colaboración con investigadores especializados en el uso de estas tecnologías.

Las muestras enviadas correspondieron a los recursos vegetales seleccionados en las pruebas preliminares (Tabla 3.1), los cuales fueron previamente deshidratados, molidos y guardados en fundas herméticas. También se enviaron muestras de los dos lúpulos (Cascade y Citra). Para su análisis, se prepararon infusiones acuosas de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas preliminares, en el que se establecieron relaciones definidas de sólido:agua y condiciones específicas de tiempo de calentamiento.

La evaluación del perfil aromático se realizó mediante una nariz electrónica (Airsense Analytics, Schwerin, Alemania), la cual consiste en un sistema de sensores químicos capaces de detectar compuestos volátiles presentes en las muestras. Estos sensores generan señales eléctricas en respuesta a la interacción con diferentes sustancias, permitiendo obtener un patrón característico de cada muestra. La información generada es posteriormente procesada mediante herramientas de análisis multivariado, lo que permite discriminar y comparar perfiles aromáticos entre muestras (Buratti et al., 2018).

El perfil gustativo fue analizado utilizando una lengua electrónica Taste-Sensing System SA 402B (Intelligent Sensor Technology Co. Ltd., Japón), que consiste en un sistema basado en sensores electroquímicos que imitan el funcionamiento del sistema gustativo humano. Estos sensores responden a compuestos disueltos en las muestras, generando señales de potenciales químicos que se asocian con atributos básicos del sabor, como acidez, amargor, salinidad, umami y astringencia. A partir de estas respuestas, se aplica también análisis multivariado y se obtiene una caracterización objetiva del perfil de sabor de cada muestra mediante el conjunto de señales generadas por los sensores (Suárez-Estrella, 2019; Buratti et al., 2018).

2.2.4 Malteado

2.2.4.1 Limpieza y desinfección de los granos de cebada

Se retiraron manualmente granos extraños y pequeñas piedras. Los granos de cebada se lavaron con abundante agua eliminando polvo, residuos superficiales y materiales livianos que pudieran ser arrastrados.

Para la desinfección, se añadió a los granos una solución de hipoclorito de sodio, preparada previamente, hasta cubrirlos, y se dejó reposar durante 5 minutos. Finalizado ese tiempo, la solución fue desechada y la cebada se enjuagó repetidas veces hasta eliminar completamente el olor residual a cloro.

2.2.4.2 Remojo

La cebada desinfectada se colocó en agua destilada en una relación 1:2 (p/p) de grano:agua, de manera que todos los granos queden sumergidos. Durante el tiempo de remojo, las semillas se guardaron en un lugar oscuro para evitar la exposición a estímulos lumínicos que puedan influir en los procesos de activación metabólica de los granos (Seo et al., 2009). Esta etapa tuvo una duración total de 48 horas.

A las 24 horas se reemplazó el agua y se mantuvo hasta alcanzar las 48 horas. Este proceso permitió la hidratación progresiva del grano y la activación enzimática necesaria para la germinación.

2.2.4.3 Germinación

Concluido el remojo, los granos hidratados fueron escurridos y distribuidos en capas uniformes sobre lienzos colocados en las parrillas de la cámara climática controlada (Memmert HPP260; Schwabach, Alemania) (Figura 2.3). La germinación se llevó a cabo durante 6 días bajo condiciones controladas de 17 ± 0.5 °C y 90% de humedad relativa (Villacís, 2024). El desarrollo del grano fue observado diariamente, considerando el crecimiento visible de las radículas como indicador del avance del proceso de germinación (Briggs et al., 2004b).



Figura 2.3. Germinación de los granos de cebada.

Fuente: Propia.

2.2.4.4 Secado y tostado

Finalizada la germinación, los granos se pasaron a un deshidratador con ventilación forzada, donde se secaron a 40 °C durante 48 horas (Aucapiña y Sacoto, 2025).

Una vez concluido el secado, las raicillas formadas durante la germinación se desprendieron manualmente por fricción entre los granos (Figura 2.4). Los residuos fueron separados utilizando un tamiz de 500 μm . La malta obtenida se almacenó en un ambiente fresco y seco hasta su utilización.

Una parte de la malta se tostó en latas de horno (Unox Bakertop Mind Lievox 8 XEBPC-08EUB, Cagliari, Italia) a 139 °C durante 19 minutos, con agitación manual cada 5 minutos para asegurar uniformidad en el tratamiento térmico (Aucapiña y Sacoto, 2025).



Figura 2.4. Tamizado de los granos germinados secos.

Fuente: Propia.

2.2.5 Elaboración de la cerveza

2.2.5.1 Molienda

Para la elaboración de la cerveza se trabajó con una proporción 80:20 de malta base:malta tostada. Se trituraron los granos (Figura 2.5) utilizando un molino de dos rodillos (Mighty Mill MILL352, USA) con una separación de 0.045 pulgadas, para exponer el almidón de su interior (Aucapiña y Sacoto, 2025).



Figura 2.5. Molienda de la malta.

Fuente: Propia.

2.2.5.2 Maceración

A la malta se le añadió agua a 70°C, trabajando con la proporción 1:4 (malta:agua). Se mantuvo la temperatura en el rango de 65-70°C durante 90 minutos de maceración. Al finalizar esta etapa se hizo recircular el mosto (Figura 2.6) para filtrarlo y homogeneizarlo. En este punto se midió el porcentaje de sólidos solubles (°Brix), y se efectuó la prueba del lugol para comprobar la hidrólisis de todos los almidones y la posterior producción de azúcares fermentables.



Figura 2.6. Recirculado después de la maceración.

Fuente: Propia.

2.2.5.3 Cocción

El mosto se mantuvo en ebullición durante 30 minutos para asegurar su esterilización. Se prepararon las infusiones de las especies vegetales y el lúpulo, según las proporciones establecidas en las pruebas preliminares. Se filtraron y se colocaron cada una en su respectivo recipiente.

2.2.5.5 Fermentación

El mosto caliente se enfrió a 30-35 °C mediante un enfriador de placas y fue transferido directamente a los recipientes de fermentación. Los recipientes se colocaron en un baño de hielo hasta alcanzar una temperatura de 20 °C, adecuada para la inoculación de la levadura (Aucapiña y Sacoto, 2025).

La levadura SafeAle US-05 (Fermentis) fue rehidratada en agua esterilizada a una temperatura entre 18 y 20 °C antes de su incorporación al mosto (Figura 2.7) para iniciar la fermentación. Se calculó la cantidad de levadura a partir de la recomendación del fabricante indicada en el sobre: 0.65 g de levadura por litro de mosto.



Figura 2.7. Inoculación de la levadura.

Fuente: Propia.

Para cada muestra se colocaron 2 L de mosto en recipientes de plástico con capacidad de 4 L. Los recipientes fueron desinfectados con amonio cuaternario y contaban con una tapa provista de un orificio para la instalación de una trampa de aire (airlock), dispositivo que permite la liberación del dióxido de carbono generado durante la fermentación, a la vez que evita la entrada de oxígeno y posibles contaminantes (Kunze, 2004). Finalmente, dichos recipientes se sellaron con plástico film y papel aluminio en la parte superior de la tapa como barrera de protección adicional para reducir el riesgo de contaminación (Figura 2.8). La fermentación se realizó por 7 días a una temperatura ambiente de 20°C. Durante ese tiempo, los recipientes se almacenaron en un lugar fresco y oscuro (Aucapiña y Sacoto, 2025).



Figura 2.8. Fermentación en recipientes sellados.

Fuente: Propia.

2.2.5.6 Envasado

Una vez concluido el proceso de fermentación, la cerveza se envasó en botellas ámbar de 330 mL (Figura 2.9), esterilizadas, utilizando equipos de venocllisis. Para obtener una carbonatación final de 2.20 volúmenes de CO₂ sugerida por Oddone (2018), se añadieron 1.65 g de azúcar a cada botella, determinados a partir de los cálculos de Aucapiña y Sacoto (2025).



Figura 2.9. Envasado en botellas.

Fuente: Propia.

2.2.5.7 Maduración

La cerveza permaneció en maduración durante un periodo de cuatro semanas, a temperatura ambiente (alrededor de 20°C). Finalizado este tiempo, las botellas se almacenaron en refrigeración hasta su análisis (Aucapiña y Sacoto, 2025).

2.2.6 Análisis fisicoquímicos

Se determinó pH, color, sólidos solubles, densidad y acidez titulable en muestras previamente desgasificadas para evitar la influencia del dióxido de carbono disuelto. El contenido alcohólico fue calculado a partir de la gravedad específica.

El contenido de sólidos solubles se determinó mediante un refractómetro digital (Pocket Refractometer PAL-1, Atago, Tokio, Japón), previamente calibrado con agua destilada. La

muestra fue atemperada y colocada sobre el prisma del equipo, se registraron las lecturas expresadas en °Brix.

El pH de las muestras se tomó con un potenciómetro digital (JENWAY 3510 pH Meter, Stone, Reino Unido). Se colocó una porción de la muestra en un vaso de precipitación y se sumergió el electrodo del equipo hasta estabilizar la lectura, registrando el valor correspondiente.

El perfil de color se analizó utilizando un colorímetro (Lovibond LC 100/SV, Dortmund, Alemania). Se colocó una alícuota de la muestra en la cubeta del equipo y se registraron los parámetros L*, a* y b* del sistema de color CIELAB, que representan la luminosidad y las coordenadas cromáticas en los ejes rojo-verde y amarillo-azul (Koren et al, 2020).

La densidad se determinó con un hidrómetro (LD Carlson, Ohio, Estados Unidos). Las muestras se vertieron en una probeta de 250 mL. Se introdujo el hidrómetro y una vez que este alcanzó su equilibrio en el líquido, se tomó la lectura indicada en la escala del mismo.

La acidez titulable se determinó mediante titulación potenciométrica (Oakton pH/mV/°C Meter pH 11 Series, Eutech Instruments, Singapur), expresando los resultados como ácido láctico. Para ello, se colocaron 10 mL de muestra en un vaso de precipitación y se titularon con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N utilizando una bureta. El punto final se registró cuando el potenciómetro indicó el pH de 8.2, y a partir del volumen de NaOH consumido se calculó la acidez titulable aplicando la ecuación correspondiente (INEN, 2002).

Para estimar el contenido de alcohol se utilizó la fórmula estándar de ABV (Alcohol por volumen) a partir de la gravedad específica inicial (OG) y gravedad específica final (FG) (Langlade, 2024), que corresponden a la densidad relativa de las muestras respecto al agua:

$$\%ABV = (OG - FG) \times 131.25$$

2.2.7 Análisis sensorial

Se realizaron pruebas sensoriales mediante pruebas triangulares con panelistas semientrenados.

2.2.7.1 Reclutamiento de candidatos

Los candidatos fueron reclutados mediante una convocatoria abierta dirigida a estudiantes y personal de la universidad interesados en participar en evaluaciones sensoriales de cerveza, completando un formulario en línea en el que se recopiló información sobre su consumo habitual de la bebida, posibles restricciones alimentarias, disponibilidad de tiempo y datos de contacto. A partir de las respuestas obtenidas se identificaron 37 voluntarios que cumplían con los criterios establecidos y que fueron convocados para participar en las sesiones de evaluación (Anexo 1).

2.2.7.2 Preselección y entrenamiento del panel

Se realizaron pruebas a los candidatos, con el fin de evaluar la agudeza de sus sentidos del gusto y olfato, capacidad discriminativa y para familiarizarlos con la dinámica de las evaluaciones sensoriales (Anexo 2) (Lawless & Heymann, 2010). Las actividades incluyeron una prueba de ordenamiento de amargor utilizando soluciones acuosas de cafeína con diferentes concentraciones, una prueba triangular empleando bebidas de cola comercial (Coca-Cola sabor original y Coca-Cola Zero) y una prueba de identificación de aromas mediante esencias (frutal, floral y herbal) colocadas en frascos de vidrio con algodón impregnado.

Los resultados obtenidos en estas pruebas permitieron seleccionar a los candidatos con mejor desempeño en la identificación de diferencias sensoriales. Se conformó un panel de 28 evaluadores semientrenados, cumpliendo con lo recomendado por la norma ISO 4120 (2004) para la aplicación de pruebas triangulares en análisis sensorial.

2.2.7.3 Prueba triangular

La evaluación sensorial de las cervezas elaboradas se realizó mediante pruebas triangulares con el objetivo de determinar si existían diferencias perceptibles entre la muestra control (con lúpulo) y las cervezas producidas utilizando cada una de las plantas seleccionadas como sustitutos.

En cada sesión, los panelistas recibieron tres muestras codificadas con números aleatorios de tres dígitos, de las cuales dos correspondían a la misma cerveza y una era diferente. Las

muestras se presentaron en distintos órdenes de combinación (AAB, ABA o BAA), asignados de manera aleatoria entre los evaluadores para evitar sesgos en la percepción (ISO 4120, 2004).

Cada muestra consistió en aproximadamente 10 mL de cerveza servida en vasos individuales de 1 onza. Las cervezas se mantuvieron refrigeradas y se sirvieron a temperatura de consumo. Entre muestras, los panelistas tomaron agua para enjuagar el paladar y minimizar posibles efectos de arrastre sensorial. El análisis se realizó dentro de cabinas sensoriales con luz roja, para evitar que diferencias en el color de las muestras interfirieran en la percepción gustativa y olfativa de los panelistas (ISO 4120, 2004; Lawless & Heymann, 2010).

Los evaluadores debían identificar cuál de las tres muestras era diferente y registrar su elección en la ficha de cata (Anexo 3). A continuación, debían marcar si la diferencia entre muestras fue percibida por su sabor, aroma o sensación en la boca. Adicionalmente, se incluyó una pregunta para indicar si la muestra evaluada resultaba agradable o no desde el punto de vista sensorial, con el propósito de explorar el potencial de aceptación de las cervezas elaboradas con las distintas plantas.

Las pruebas triangulares se realizaron comparando la cerveza control con cervezas elaboradas con cada una de las muestras que superaron los análisis preliminares (n=2).

2.2.8. Análisis estadístico

Los datos obtenidos de los análisis fisicoquímicos (sólidos solubles, pH, densidad, contenido de alcohol, acidez titulable y parámetros colorimétricos L^* , a^* , b^*) se expresaron como media \pm desviación estándar. Para la comparación entre cada tratamiento (cervezas elaboradas con recursos vegetales) y la cerveza control (lúpulo), se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes con corrección de Welch, la cual no asume igualdad de varianzas entre los grupos (Xu et al., 2017).

Se establecieron niveles de significancia de $\alpha = 0.1$, 0.01 y 0.001, con el objetivo de identificar diferencias con distintos grados de rigurosidad estadística. Los valores de p obtenidos a partir de pruebas bilaterales (dos colas) se compararon con estos niveles de significancia, considerando que existían diferencias significativas cuando $p < \alpha$. El análisis estadístico se realizó mediante el complemento de Análisis de datos del software Microsoft Excel.

Los resultados de la prueba triangular se analizaron mediante el uso de tablas de distribución binomial (Anexo 4), de acuerdo con lo establecido para pruebas de diferenciación sensorial (Lawless & Heymann, 2010). El número de respuestas correctas obtenidas en cada evaluación se comparó con los valores críticos correspondientes al número de panelistas y al nivel de significancia seleccionado, considerando una probabilidad de acierto por azar de $p = 1/3$, propia de este tipo de prueba.

Se consideró que existían diferencias significativas entre las muestras cuando el número de respuestas correctas superaba el valor mínimo requerido según la tabla de referencia, para los niveles de significancia de $\alpha = 0.05$ y $\alpha = 0.01$. Las réplicas se analizaron de forma independiente, siguiendo las recomendaciones para este tipo de ensayos sensoriales.

En cuanto a las preguntas complementarias del análisis sensorial, relacionadas con la identificación de atributos (sabor, aroma y sensación en boca) y la aceptabilidad de las muestras, los resultados se expresaron como porcentajes. Para la segunda pregunta, los porcentajes se calcularon en función del número de panelistas que identificaron correctamente la muestra diferente, permitiendo la selección de múltiples atributos. Para la tercera pregunta, los porcentajes se calcularon con base en el total de panelistas participantes. En ambos casos, los resultados se presentan como promedio de las réplicas \pm desviación estándar.

Capítulo 3

Resultados y Discusiones

3.1. Pruebas Preliminares

Durante la etapa preliminar de evaluación de las especies vegetales se descartaron varios candidatos, ya sea por presentar perfiles aromáticos y gustativos poco compatibles con la cerveza, regustos y gustos amargos desagradables, o intensidades de aroma y sabor insuficientes.

En la última fase se seleccionaron 11 plantas que mostraron características sensoriales afines para la elaboración de la cerveza, las cuales se destacan por aportar gustos amargos y perfiles aromáticos agradables, además de ser las menos diferentes al lúpulo.

En la tabla 3.1 se presentan las especies seleccionadas, junto al lúpulo cascade. Estas cantidades de muestras fueron disueltas en 100 mL de agua, para obtener los extractos con las proporciones deseadas para su incorporación a las cervezas. La cantidad de sólido añadido se determinó asemejando la intensidad de amargor de los extractos vegetales con el estándar de lúpulo.

Tabla 3.1. Especies vegetales seleccionadas y proporciones para preparación de infusiones.

Muestra	Masa (g)
Guayusa	0.09
Ishpingo	0.135
Guaviduca	0.045
Rúcula	0.045
Guayaba cáscara	0.09
Guayaba hoja	0.09
Chilca	0.045
Cedrón	0.09
Matico	0.135
Granadilla	0.18
Diente de león	0.18
Lúpulo	0.075

3.2. Lengua y nariz electrónica

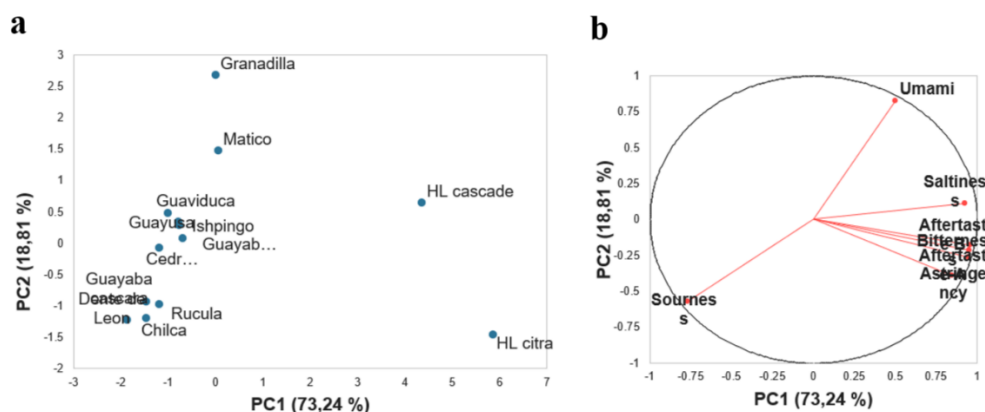
Los resultados obtenidos mediante lengua electrónica se representaron mediante análisis de componentes principales (PCA) (Figura 3.1), el cual permite agrupar las muestras de acuerdo a los resultados obtenidos, evidenciando patrones de similitud o diferencia entre las muestras evaluadas. En este tipo de representación, las dos primeras componentes principales (PC1 y PC2) permiten explicar en mayor proporción las similitudes y diferencias entre las muestras.

La gráfica se presenta en formato biplot, donde se superponen dos tipos de información: por un lado, las muestras analizadas (infusiones elaboradas con los distintos recursos vegetales y los controles con lúpulo), y por otro, las variables sensoriales estimadas por el sistema (atributos de sabor como amargor, acidez, umami, salinidad y astringencia y retrogusto).

Las muestras se distribuyen en el plano en función de la respuesta global de los sensores, de manera que aquellas ubicadas en posiciones cercanas presentan perfiles de sabor similares, mientras que una mayor distancia entre puntos indica diferencias más marcadas (gráfico de puntuaciones). Por su parte, los vectores correspondientes a los atributos sensoriales indican la dirección de incremento de cada variable, de modo que la proximidad de una muestra hacia un determinado vector sugiere una mayor asociación con ese atributo (gráfico de cargas).

De acuerdo a la PCA, (Figura 3.1) las 2 muestras de lúpulo se ubican hacia la derecha en el gráfico de puntuaciones (Figura 3.1a), que corresponde a sabores amargos, astringentes e incluso salados. Se observa una mayor tendencia hacia el umami por parte del cascade, y una tendencia hacia el ácido y astringente por parte del citra. Al lado izquierdo, se posicionan todas las muestras de las plantas, la cual corresponde a gustos con tendencia ácida de acuerdo al gráfico de cargas (Figura 3.1b). Cabe destacar que el matico y la granadilla presentan menor tendencia al gusto ácido, alejándose de las demás plantas en la zona del sabor ácido; pero, al ubicarse en la parte superior del gráfico de puntuaciones, se observa cierta tendencia hacia el gusto umami, asemejándose en esta característica al lúpulo cascade.

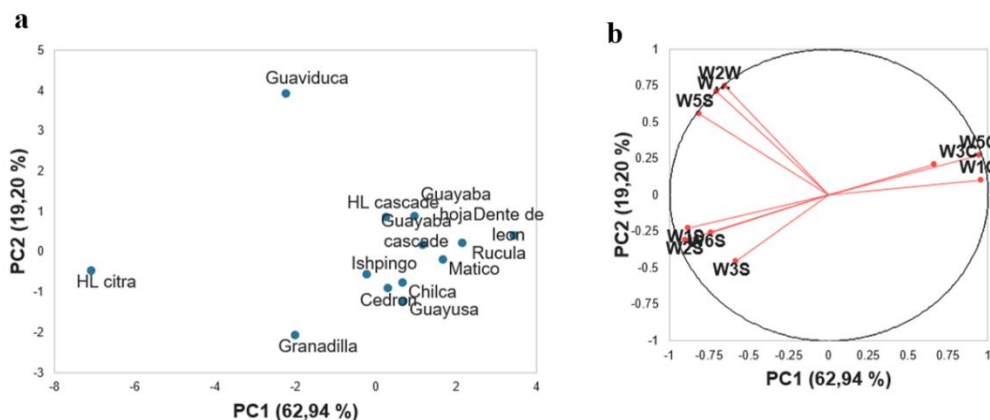
Figura 3.1. PCA de lengua electrónica.



Fuente: *Università degli studi di Milano.*

Por otro lado, la nariz electrónica (Figura 3.2) permitió observar que el aroma del lúpulo cascade se posiciona junto con la mayoría de plantas (Figura 3.2a), mientras que el citra, nuevamente, se encuentra lejos de las muestras. En el lúpulo citra predominaron aromas a hidrógeno, metano y alcohol, mientras que en el cascade se detectó un perfil de compuestos aromáticos a amonio y alcanos (Figura 3.2b y Tabla 3.2), situándose del lado opuesto de la gráfica.

Figura 3.2. PCA de nariz electrónica.



Fuente: *Università degli studi di Milano.*

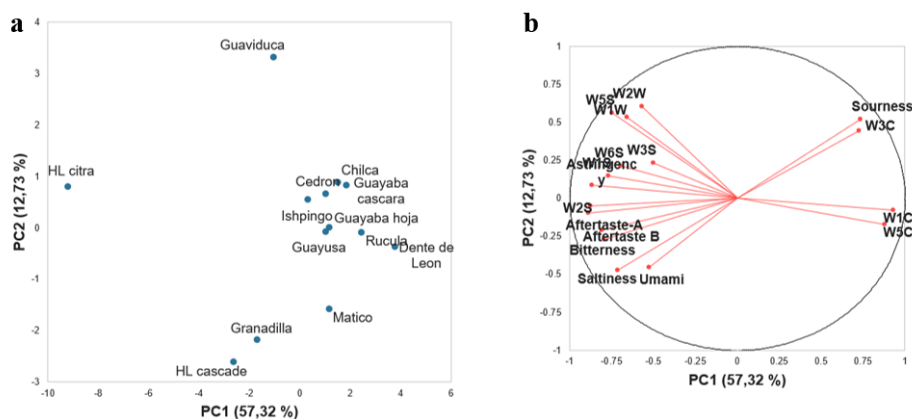
Tabla 2.2. Compuestos relevantes detectados por la nariz electrónica.

	Sensor	Clase de compuestos relevantes
1	W1C	Compuestos aromáticos
2	W5S	Óxido nítrico, baja especificidad
3	W3C	Amonio, compuestos aromáticos
4	W6S	Hidrógeno
5	W5C	Alcanos, compuestos aromáticos, compuestos menos polares
6	W1S	Metano, baja especificidad
7	W1W	Compuestos sulfurados, terpenos, limoneno, pirazinas
8	W2S	Alcohol, compuestos parcialmente aromáticos, baja especificidad
9	W2W	Compuestos aromáticos, compuestos orgánicos sulfurados
10	W3S	Metano

Fuente: *Università degli studi di Milano.*

Al integrar los resultados obtenidos mediante nariz electrónica y lengua electrónica (Figura 3.3), se permite una evaluación conjunta de los perfiles aromáticos y gustativos de las muestras. Esta representación proporciona una visión global del perfil sensorial instrumental, al considerar simultáneamente la información asociada al aroma y al sabor. En la figura 3.3a se observa que plantas como el matico y la granadilla se aproximan al lúpulo cascade, a pesar de que en los análisis individuales de nariz y lengua electrónica no se presentaron muy cercanos al mismo. Este comportamiento evidencia que, aunque existan diferencias en los atributos gustativos, podría haber interacciones sensoriales que contribuyan a una aproximación global entre las muestras. En las 3 evaluaciones instrumentales fue evidente que el perfil del lúpulo citra es lejano al de las muestras vegetales, por lo que se decidió descartarlo y seleccionar al lúpulo cascade como referencia comparativa en las siguientes etapas.

Figura 3.3. PCA de nariz y lengua electrónica combinadas.



Fuente: *Università degli studi di Milano.*

3.3 Análisis fisicoquímicos

En el caso de los sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix) (Tabla 3.3), varias muestras presentaron diferencias significativas respecto al control, particularmente guayusa, ishpingo, guaviduca, chilca y diente de león, lo que puede atribuirse a una mayor liberación de compuestos solubles hacia el medio durante el proceso de elaboración, principalmente azúcares simples y otros solutos presentes en las matrices vegetales, ya sea por afinidad con el solvente o porque están presentes en mayor cantidad en esas muestras. Sin embargo, no se observa un patrón claro en función del tipo de estructura vegetal, ya que las especies que presentan mayores concentraciones de sólidos solubles incluyen tanto hojas como tejidos más fibrosos o estructuras más densas. Esto sugiere que la variación en los sólidos solubles no depende únicamente de la naturaleza del tejido, sino también de factores como la composición específica de cada planta y la facilidad de extracción de sus componentes bajo las condiciones del proceso. En este sentido, las diferencias observadas podrían estar relacionadas con la disponibilidad y liberación diferencial de compuestos solubles más que con una característica estructural única de las materias primas (Azmir et al., 2013). A pesar de las diferencias significativas, las muestras se encuentran dentro de los rangos sugeridos por Aucapiña y Sacoto (2025) para sólidos solubles finales de cervezas elaboradas con cebada, planteando el intervalo de 4.9 a 6.6 $^{\circ}$ Brix. Entre las muestras los valores oscilaron de 4.98 a 5.58 $^{\circ}$ Brix, correspondiendo el menor a la cáscara de guayaba y el mayor al diente de león, y encontrándose la muestra de lúpulo en un punto medio con 5.25 $^{\circ}$ Brix.

La densidad final de la cerveza típicamente se encuentra entre 1.002 g/cm³ y 1.030 g/cm³ (Briggs et al., 2004a). Los valores obtenidos (Tabla 3.3), oscilaron entre 1.0037 g/cm³ y

1.0067 g/cm³, correspondiendo el valor más bajo a la cerveza elaborada con rúcula y el más alto a la muestra con diente de león, mientras que la cerveza control presentó una densidad de 1.0048 g/cm³. A pesar de las diferencias observadas, todas las muestras se mantuvieron dentro del rango reportado para cervezas tipo Ale, indicando que la sustitución del lúpulo no comprometió las características generales del producto. En este parámetro, varias de las muestras presentaron diferencias significativas respecto al control, lo que indica que la incorporación de algunos recursos vegetales influyó en el contenido final de sólidos del sistema. Este comportamiento se observó en especies como hoja de guayaba, cedrón, matico, guaviduca, chilca y diente de león, coincidiendo que las 3 últimas también fueron significativamente diferentes en las mediciones de sólidos solubles. A diferencia del mosto base, donde la mayor parte de los azúcares fermentables es metabolizada por las levaduras, los compuestos provenientes de las plantas, como polisacáridos estructurales parcialmente solubles, compuestos fenólicos o fracciones no fermentables, pueden contribuir al aumento del extracto residual (Pires et al., 2014). Asimismo, es importante considerar que la magnitud de este efecto no depende únicamente del tipo de tejido vegetal, sino de la interacción entre su composición química y la facilidad con la que estos compuestos son liberados durante el proceso de elaboración. En este sentido, las diferencias observadas sugieren que ciertas especies presentan una mayor disponibilidad de componentes solubles o una mayor susceptibilidad a la extracción térmica, lo que se traduce en variaciones en la densidad final de la cerveza (Azmir et al., 2013).

El contenido de alcohol (Tabla 3.3) fue uno de los parámetros más estables entre las muestras, sin diferencias significativas en la mayoría de los casos, lo que indica que la sustitución del lúpulo no afectó de manera relevante la producción de etanol. No obstante, el matico presentó una disminución significativa en este parámetro, lo que sugiere una posible interferencia en el proceso fermentativo. Esta especie, ha sido reportada por contener compuestos fenólicos y metabolitos secundarios con actividad antimicrobiana (Rojas et al., 2003), los cuales podrían haber interactuado negativamente con las levaduras y afectar su actividad metabólica (Kimani et al., 2021), derivando en una conversión menos eficiente de los azúcares fermentables y dando lugar a una menor producción de alcohol. Sin embargo, dado que este efecto no se replicó en el resto de las muestras, se puede considerar que se trata de un comportamiento específico asociado a la composición del matico más que a una tendencia general derivada de la sustitución del lúpulo.

Los valores obtenidos del contenido de alcohol oscilaron entre 4.51% y 4.90% v/v, siendo el valor más alto el de la cerveza elaborada con rúcula y el menor el de la muestra con diente de león, mientras que la cerveza control (lúpulo) presentó un contenido alcohólico de 4.75% v/v. Todos los tratamientos se mantuvieron dentro del rango esperado para cervezas tipo Ale, el cual suele situarse aproximadamente entre 2% y 8% v/v (Briggs et al., 2004a), evidenciando que las variaciones observadas no comprometieron las características propias del producto.

Tabla 3.3. Sólidos solubles, densidad y contenido de alcohol de las cervezas.

Muestra (cerveza)	Sólidos solubles (°Brix)	Densidad (g/cm ³)	Contenido de alcohol (%v/v)
Lúpulo	5.25 ± 0.22	1.0048 ± 0.0009	4.75 ± 0.10
Guayusa	5.53 ± 0.15**	1.0045 ± 0.0010	4.79 ± 0.15
Ishpingo	5.5 ± 0.20*	1.0055 ± 0.0014	4.66 ± 0.22
Guaviduca	5.48 ± 0.17*	1.0050 ± 0.0001*	4.73 ± 0.00
Rúcula	5.3 ± 0.19	1.0037 ± 0.0029	4.90 ± 0.49
Guayaba cáscara	4.98 ± 0.33	1.0048 ± 0.0004	4.75 ± 0.03
Guayaba hoja	5 ± 0.31	1.0050 ± 0.0001*	4.73 ± 0.00
Chilca	5.5 ± 0.20*	1.0050 ± 0.0001*	4.73 ± 0.00
Cedrón	5.15 ± 0.18	1.0040 ± 0.0011*	4.86 ± 0.19
Matico	5.4 ± 0.26	1.0055 ± 0.0005*	4.66 ± 0.03*
Granadilla	5.02 ± 0.42	1.0043 ± 0.0008	4.81 ± 0.12
Diente de león	5.58 ± 0.13***	1.0067 ± 0.0015*	4.51 ± 0.25

Nota: Los asteriscos indican diferencia significativa entre la muestra y la cerveza con lúpulo (*p < 0.1; **p < 0.01; ***p < 0.001, t-Test.)

En cuanto al pH y la acidez titulable (Tabla 3.4), no se observaron diferencias significativas entre las cervezas elaboradas con diferentes recursos vegetales y la cerveza control. Este resultado indica que la incorporación de las distintas especies no generó una modificación relevante en el equilibrio ácido del sistema. Los valores de pH obtenidos oscilaron entre 3.75 y 4.39, correspondiendo el valor más alto a la cerveza con lúpulo, seguido del diente de león con un pH de 4.28, mientras que las muestras con cáscara de guayaba, hoja de guayaba y rúcula presentaron los valores más bajos. Aun así, todas las muestras se mantuvieron dentro del rango establecido para cerveza por la norma INEN 2262 (3.5-5.0), reflejando condiciones

compatibles con la estabilidad y calidad del producto. De manera similar, la acidez titulable presentó valores comprendidos entre 0.37% y 0.70% de ácido láctico, registrándose el valor más alto en la muestra elaborada con rúcula y el más bajo en la de guayusa. Aunque todas las muestras superaron el valor de referencia de 0.3% establecido por la normativa (INEN 2262, 2003), las variaciones observadas no fueron estadísticamente significativas respecto al control de lúpulo, que tuvo una acidez de 0.42%.

El comportamiento conjunto de ambos parámetros resulta coherente, ya que el pH y la acidez titulable se encuentran estrechamente relacionados con la concentración y naturaleza de los compuestos ácidos presentes en la cerveza. Mientras la acidez titulable cuantifica la cantidad total de ácidos capaces de neutralizarse, el pH depende del grado de disociación de dichos compuestos y de la capacidad amortiguadora del sistema (Tyl y Sadler, 2017). En este sentido, las ligeras variaciones registradas entre tratamientos podrían atribuirse a diferencias en la composición de ácidos orgánicos provenientes de las especies vegetales, aunque su efecto habría sido parcialmente estabilizado por la dinámica fermentativa y la composición del mosto (Kunze, 2014).

En cuanto a los parámetros colorimétricos (Tabla 3.4), no se identificaron diferencias significativas en los valores de luminosidad (L^*) entre las muestras y la cerveza de lúpulo, manteniéndose dentro de un rango de 53.38 a 57.78, siendo el valor menor de la cáscara de guayaba y el mayor de la guaviduca, lo que indica que la incorporación de los distintos recursos vegetales no afectó de manera relevante la claridad o intensidad global del color de las cervezas. Este resultado es consistente con lo reportado para sistemas cerveceros, donde la luminosidad está principalmente determinada por la composición del mosto base y el proceso de elaboración, especialmente el tipo de malta empleado (Briggs et al., 2004a; Kunze, 2014).

Por otro lado, en los parámetros cromáticos a^* y b^* sí se observaron diferencias significativas en varias de las muestras, evidenciando modificaciones en la tonalidad del producto final. El parámetro a^* , que describe la transición entre tonalidades verdes (valores negativos) y rojas (valores positivos), mostró incrementos significativos respecto a la cerveza de lúpulo en especies como guayusa, ishpingo, guaviduca, cedrón y cáscara de guayaba, lo que refleja una mayor tendencia hacia matices rojizos respecto al control, y disminuciones significativas en la rúcula y la hoja de guayaba mostrando matices que tienden menos al rojo, resultados que son coherentes con las tonalidades de las especies en el estado que fueron aplicadas. Se puede

ubicar en la tabla 3.4 que esta tendencia a las tonalidades rojizas va de 5.88 en la granadilla (menos rojiza), hasta 8.48 en el cedrón (más rojiza), centrándose la muestra control con lúpulo en 6.70.

De manera similar, el parámetro b^* , asociado a la variación entre azul (valores negativos) y amarillo (valores positivos), presentó diferencias significativas en muestras como guayusa, ishpingo, rúcula, hoja de guayaba, cedrón y granadilla, indicando cambios en la intensidad de los tonos amarillos característicos de las cervezas tipo Ale (Briggs et al., 2004a). Se observa que en este parámetro colorimétrico (Tabla 3.4), la muestra del lúpulo se encuentra nuevamente en un punto central con un b^* de 34.4, mientras que las cervezas con las distintas especies vegetales forman un rango de 31.27 a 37.02, correspondiendo el valor menor a la rúcula (menos amarilla) y el mayor a la guayusa (más amarillo).

Tabla 3.4. Resultados de los análisis de pH, acidez y colorimetría de las cervezas.

Muestra (cerveza)	pH	Acidez (%)	Colorimetría		
			L*	a*	b*
Lúpulo	4.39 ± 0.22	0.42 ± 0.12	56.10 ± 3.52	6.70 ± 0.86	34.40 ± 1.63
Guayusa	4.17 ± 0.07	0.37 ± 0.07	57.07 ± 3.42	8.35 ± 0.47***	37.02 ± 1.09***
Ishpingo	3.98 ± 0.18	0.55 ± 0.19	55.80 ± 5.27	7.43 ± 0.35**	33.17 ± 0.91*
Guaviduca	4.07 ± 0.05	0.41 ± 0.07	57.78 ± 3.45	7.28 ± 0.67*	34.08 ± 1.15
Rúcula	3.77 ± 0.25	0.70 ± 0.39	54.95 ± 6.85	5.92 ± 0.23***	31.27 ± 2.07*
Guayaba cáscara	3.75 ± 0.34	0.57 ± 0.26	53.38 ± 7.87	7.38 ± 0.41***	32.15 ± 3.05
Guayaba hoja	3.76 ± 0.25	0.54 ± 0.18	56.92 ± 2.97	6.27 ± 0.83**	32.07 ± 0.87***
Chilca	4.15 ± 0.13	0.41 ± 0.01	56.78 ± 4.18	7.38 ± 0.82	35.23 ± 1.50
Cedrón	4.07 ± 0.15	0.39 ± 0.04	55.25 ± 3.81	8.48 ± 0.29***	35.33 ± 0.68*
Matico	4.15 ± 0.18	0.40 ± 0.10	57.09 ± 5.29	6.88 ± 1.65	34.55 ± 1.22
Granadilla	4.12 ± 0.12	0.43 ± 0.04	56.00 ± 4.99	5.88 ± 1.67	31.48 ± 3.27*
Diente de león	4.28 ± 0.09	0.41 ± 0.03	57.17 ± 4.24	7.15 ± 1.26	34.27 ± 1.35

Nota: Los asteriscos indican diferencia significativa entre la muestra y la cerveza con lúpulo (* $p < 0.1$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$, t-Test.).

Al evaluar en conjunto los resultados fisicoquímicos, especies como la granadilla, la rúcula y la cáscara de guayaba presentan propiedades más similares a la cerveza elaborada con lúpulo, al no evidenciar diferencias significativas en parámetros clave como sólidos solubles, pH, densidad, acidez, contenido alcohólico y luminosidad respecto al control. Estas especies muestran variaciones moderadas en colorimetría, sin alterar de manera crítica las características del producto. Por otro lado, el matico, si bien presenta diferencia significativa en el contenido de alcohol y la densidad, en los parámetros cromáticos, de sólidos solubles, pH, acidez y luminosidad refleja similitud. Los resultados permiten identificar que no todas las plantas presentan el mismo potencial de sustitución desde el punto de vista fisicoquímico, ya que las diferencias significativas son atribuibles a la naturaleza composicional de cada material vegetal.

3.4. Análisis Sensorial

Tras la aplicación de la prueba triangular, los resultados obtenidos (Tabla 3.5) evidenciaron que, en todas las comparaciones realizadas, el número de aciertos superó el valor crítico establecido para un nivel de significancia de $p < 0.01$, lo que indica que las cervezas elaboradas con las distintas especies vegetales fueron percibidas como sensorialmente diferentes respecto a la cerveza control elaborada con lúpulo. Este comportamiento se mantuvo uniforme en ambas réplicas, lo que sugiere una adecuada reproducibilidad de los resultados y una capacidad discriminativa suficiente por parte del panel.

Aunque todas las muestras fueron significativamente diferentes del control desde el punto de vista estadístico, el grado de diferenciación no fue uniforme entre las especies evaluadas. En este sentido, el número de aciertos obtenido en cada caso permite interpretar la intensidad de la diferencia percibida. Especies como la rúcula, cáscara de guayaba y granadilla, presentaron los mayores valores de identificación positiva de diferencias por parte del panel sensorial, evidenciando mayor notoriedad de características distintas a las de cervezas con lúpulo. Este resultado puede estar relacionado con la presencia de compuestos con diferentes perfiles sensoriales, como notas frutales intensas o compuestos azufrados y glucosinolatos en el caso de la rúcula (D'Antuono et al., 2009).

Por el contrario, el matico, chilca y diente de león mostraron valores más cercanos al umbral de significancia que es de 15 aciertos según la tabla propuesta por según Lawless y Heymann

(Anexo 4; n = 28 panelistas; p < 0.05). Las medias de los aciertos para estas muestras fueron de 17.50 ± 2.12 , 18.00 ± 0.00 y 18.50 ± 0.71 , respectivamente. Esto sugiere que, aunque dicha diferencia es detectable, es menos evidente para los evaluadores. Se observa que estas especies podrían compartir características sensoriales más compatibles con el perfil del lúpulo cascade, particularmente en términos de amargor moderado y presencia de notas herbales. Diversos recursos vegetales contienen compuestos fenólicos y sustancias amargas naturales que, aunque no idénticas a los iso- α -ácidos del lúpulo, pueden generar sensaciones gustativas comparables en intensidad y calidad, contribuyendo a una menor diferenciación.

Tabla 3.5. Resultados de la prueba triangular para la diferenciación sensorial entre la cerveza control (lúpulo) y las cervezas elaboradas con plantas (n=28 panelistas).

Muestra (cerveza)	Número de aciertos	
	Réplica 1	Réplica 2
Guayusa	22	20
Ishpingo	17	25
Guaviduca	21	19
Rúcula	22	27
Guayaba cáscara	22	27
Guayaba hoja	19	23
Chilca	18	18
Cedrón	21	19
Matico	16	19
Granadilla	19	26
Diente de león	18	19

No se reportan diferencias significativas en esta tabla al superar todos los datos el número mínimo de aciertos para la distribución binomial en pruebas triangulares de Lawless y Heymann (2010) ($p < 0.05$; n = 28 panelistas).

Los atributos sensoriales asociados a la diferenciación entre las muestras se presentan en la tabla 3.6. Los porcentajes fueron calculados con base al número de respuestas correctas en cada réplica y posteriormente promediados entre las tandas de evaluación.

Tabla 3.6. Atributos sensoriales asociados a la diferenciación entre las muestras según la percepción de los panelistas.

Muestra (cerveza)	Sabor (%)	Aroma (%)	Sensación en la boca (%)
Guayusa	62.5	55.4	32.1
Ishpingo	69.6	41.1	41.1
Guaviduca	57.1	37.5	39.3
Rúcula	76.8	39.3	44.6
Guayaba C.	82.1	44.6	30.4
Guayaba H.	69.6	39.3	35.7
Chilca	57.1	33.9	30.4
Cedrón	64.3	33.9	26.8
Matico	50.0	33.9	37.5
Granadilla	69.6	42.9	33.9
Diente de león	62.5	28.6	30.4

Los valores corresponden al porcentaje de panelistas que identificaron correctamente la muestra diferente en la prueba triangular y que asociaron dicha diferencia a cada atributo sensorial. Se permitió la selección de más de una opción.

El sabor fue el principal descriptor señalado por los panelistas para identificar la muestra diferente en todas las especies evaluadas, destacándose valores elevados en plantas como la cáscara de guayaba y la rúcula, seguidas por el ishpingo, la hoja de guayaba y la granadilla. Este comportamiento es coherente con los resultados de la prueba triangular, ya que las muestras que presentaron mayores porcentajes asociados al sabor coinciden con aquellas que registraron un mayor número de aciertos en la identificación de la muestra diferente. Esto indica que las diferencias percibidas frente a la cerveza control estuvieron principalmente relacionadas con cambios en el perfil de sabor, ligadas tanto al amargor característico del lúpulo como a las notas propias de cada recurso vegetal. Sin embargo, esta tendencia no presentó la misma intensidad para todas las muestras: cervezas con matico, chilca y guaviduca presentaron menores porcentajes de selección de este atributo, infiriendo que su perfil resulta más cercano al del lúpulo en comparación con el resto.

En cuanto al aroma, su participación en la diferenciación entre muestras fue menor en comparación con el sabor, lo que indica que este atributo tuvo un papel más limitado en la identificación de la muestra distinta. Además, se refleja en la relación con los resultados de la prueba triangular, ya que las especies con menor selección de aroma, como el matico, el cedrón y la chilca, no destacaron por presentar altos niveles de aciertos. El diente de león registró el valor más bajo en este atributo entre todas las especies, evidenciando una menor contribución de su perfil aromático en la percepción de diferencia, y la guayusa, por su parte, tuvo el mayor porcentaje, determinando que sus compuestos volátiles generaron un contraste más evidente frente al perfil aromático del lúpulo.

Estos resultados tuvieron cierta cercanía a los obtenidos con la lengua y nariz electrónica. Se puede observar que en la figura 3.1 (lengua electrónica), el matico y la guayusa sí se encuentran relativamente más cerca del lúpulo cascade en relación con otras especies, mientras que la chilca está mucho más lejos. En la figura 3.2 (nariz electrónica), el matico se ubica muy próximo al lúpulo cascade, mientras que el cedrón, la chilca y el diente de león se alejan demasiado para considerar similitud.

A diferencia del sabor y el aroma, la sensación en boca tuvo un aporte más discreto en la diferenciación entre las muestras. En general, los valores obtenidos muestran que varias especies se mantienen relativamente cercanas al comportamiento del lúpulo en este aspecto, especialmente el cedrón, seguido por el diente de león, la chilca y la cáscara de guayaba. Esto podría significar que características como el cuerpo o la carbonatación no se ven tan alteradas por el tipo de recurso vegetal utilizado.

Las respuestas acerca de si resultan agradables las cervezas elaboradas con diferentes recursos vegetales fueron muy variadas (Tabla 3.7). A pesar de que todas las muestras fueron percibidas como significativamente diferentes a las elaboradas con lúpulo, varias de las cervezas elaboradas con los recursos vegetales resultaron agradables a más del 70% del panel, incluyendo cervezas con guayusa, chilca, cedrón y diente de león, evidenciando que la diferenciación sensorial no se traduce necesariamente en una menor aceptación por parte de los consumidores y, aunque su perfil sensorial difiere del lúpulo, poseen características organolépticas que resultan atractivas, aspecto que puede atribuirse a la incorporación de notas aromáticas y gustativas agradables propias de cada recurso vegetal.

Tabla 3.7. Nivel de agrado de las diferentes cervezas.

Especie	Nivel de agrado (%)
Guayusa	76.79 ± 2.53
Ishpingo	48.21 ± 32.83
Guaviduca	64.29 ± 5.05
Rúcula	35.71 ± 25.25
Guayaba C.	48.21 ± 42.93
Guayaba H.	51.79 ± 22.73
Chilca	75.00 ± 5.05
Cedrón	73.21 ± 12.63
Matico	67.86 ± 0.00
Granadilla	55.36 ± 12.63
Diente de león	71.43 ± 10.10

Por otro lado, las cervezas con ishpingo y las dos de guayaba, presentaron menores niveles de agrado, lo que indicaría que, en estos casos, las modificaciones en el perfil sensorial no gustaron a los panelistas. Estas diferencias ponen en evidencia la importancia de evaluar no solo la similitud con el lúpulo, sino también la aceptación global del producto al considerar alternativas para su sustitución total o parcial; o como fuentes interesantes para la elaboración de cervezas saborizadas.

En conjunto, los resultados instrumentales y sensoriales sugieren que la sustitución del lúpulo mediante un único recurso vegetal (entre los estudiados en el presente trabajo) presenta limitaciones, ya que las diferencias percibidas por los panelistas estuvieron principalmente asociadas al sabor, mientras que el aroma tuvo una menor contribución en la discriminación. Sin embargo, el análisis combinado de nariz y lengua electrónica evidencia que algunas plantas presentan similitudes parciales con el lúpulo en distintas dimensiones sensoriales. Esto abre la posibilidad de plantear estrategias de formulación basadas en la combinación de recursos vegetales, en las cuales uno aporte características aromáticas similares al lúpulo y otro contribuya al perfil gustativo, con el fin de lograr una aproximación más completa al perfil sensorial deseado.

Conclusiones

A partir de los análisis fisicoquímicos, sensoriales e instrumentales (nariz y lengua electrónica), se concluye que ninguna de las especies evaluadas reproduce de manera completa el perfil del lúpulo, reflejando la propia complejidad química y sensorial de este ingrediente en el sistema cervicero. No obstante, es posible identificar tendencias claras en cuanto al grado de similitud. La granadilla destaca como la especie con mayor consistencia global, al presentar un comportamiento cercano al control en los parámetros fisicoquímicos, así como una relativa proximidad en el perfil aromático instrumental, aunque con diferencias perceptibles a nivel sensorial. Por su parte, el matico muestra una mayor afinidad desde el punto de vista sensorial y aromático, siendo una de las especies menos diferenciadas por los panelistas y con perfiles instrumentales cercanos al lúpulo; sin embargo, presenta limitaciones en el ámbito fisicoquímico, particularmente en el contenido de alcohol, lo que sugiere una interacción con el proceso fermentativo. Especies como la rúcula y la cáscara de guayaba, si bien presentan similitudes en los parámetros fisicoquímicos, evidencian una mayor diferenciación sensorial, atribuida a la intensidad de sus características gustativas propias. Estos resultados ponen de manifiesto que la similitud con el lúpulo depende del enfoque de análisis considerado, y que la selección de un sustituto potencial no puede basarse en un único criterio. En este sentido, la combinación estratégica de diferentes recursos vegetales, aprovechando sus aportes complementarios en aroma y sabor, se perfila como una alternativa más viable que el uso individual de una sola especie.

Referencias Bibliográficas

- Acosta-Rangel, A., Rechcigl, J. E., Bollin, S., Deng, Z., & Agehara, S. (2021). Hop (*Humulus lupulus* L.) phenology, growth, and yield under subtropical climatic conditions: effects of cultivars and crop management. *Australian Journal of Crop Science*, 15(5), 764–772. https://www.cropj.com/rangel_15_5_2021_764_772.pdf
- Adenuga, W., Olaleye, O. N., & Adepoju, P. A. (2010). Utilization of bitter vegetable leaves (*Gongronema latifolium*, *Vernonia amygdalina*) and *Garcinia kola* extracts as substitutes for hops in sorghum beer production. *African Journal of Biotechnology*, 9(51), 8819–8823. DOI: 10.5897/AJB10.1179
- Aucapiña Espinoza, R. S. y Sacoto Aguilera, N. D. (2025). *Aplicación de diseño experimental y métodos multicriterio para optimización de cervezas elaboradas a partir de trigo y cebada que se cultivan en la provincia del Cañar*. Universidad del Azuay [Tesis de Pregrado]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/15966>
- Azmir, J., Zaidul, I.S.M., Rahman, M.M., Sharif, K.M., Mohamed, A., Sahena, F., Jahurul, M.H.A., Ghafoor, K., Norulaini, N.A.N. y Omar, A.K.M. (2013). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *Journal of Food Engineering*, 117(4), 426-436. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014>.
- Bennett, R. N., & Wallsgrove, R. M. (2020). Secondary metabolites in plant defence mechanisms. *New Phytologist*, 228(1), 39–55. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1994.tb02968.x>
- Briggs, D. E., Boulton, C. A., Brookes, P. A. y Stevens, R. (2004a). 19 - Chemical and physical properties of beer. En *Brewing* (pp. 662-715), Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. <https://doi.org/10.1533/9781855739062.662>
- Briggs, D. E., Boulton, C. A., Brookes, P. A., & Stevens, R. (2004b). Malts, adjuncts and supplementary enzymes. En *Brewing* (pp. 11–51), Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. <https://doi.org/10.1533/9781855739062.11>
- Buratti, S., Malegori, C., Benedetti, S., Oliveri, P., & Giovanelli, G. (2018). E-nose, e-tongue and e-eye for edible olive oil characterisation and shelf life assessment: A powerful data fusion approach. *Talanta*, 182, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.01.096>
- Calvo Montoya, M. (2020). *Estudio observacional del efecto de la concentración de lúpulo y su tiempo de extracción mediante la técnica de dry hopping sobre el agrado en una cerveza estilo “American Pale Ale”*. Kérwá - Repositorio Universidad de Costa Rica. <https://hdl.handle.net/10669/86180>

- Campos, O. P., Leme, F. M., Fortuna, G. C., Gomes, J. A. de O., Neves, C. S., Arruda, R. do C. de O., & Bonfim, F. P. G. (2023). Morphological characteristics, trichomes, and phytochemistry of inflorescences of *Humulus lupulus* L: Comparison of cropping systems and varieties. *Australian Journal of Crop Science (AJCS)*, 17(3), 263–274.
https://www.cropj.com/campos_17_3_2023_263_274.pdf
- Carbone, K. & Gervasi, F. (2022). An updated review of the genus *Humulus*: A valuable source of bioactive compounds for health and disease prevention. *Plants*, 11(24), 3434.
<https://doi.org/10.3390/plants11243434>
- D'Antuono, L. F., Elementi, S., Neri, R. (2009). Exploring new potential health-promoting vegetables: glucosinolates and sensory attributes of rocket salads and related *Diplotaxis* and *Eruca* species. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(4), 713–722.
doi:10.1002/jsfa.3507
- de Smidt, O., du Plessis, W., Zacharia, P. R., & Manduna, I. T. (2025). Comparison of major compounds in essential oils steam distilled from fresh plant material of South African hop varieties. *Life*, 15(2), 282. <https://doi.org/10.3390/life15020282>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2024). Producción - Cultivos y productos de ganadería. *FAOSTAT [Database]*. Revisado en marzo de 2026. <https://www.fao.org/faostat/es/#compare>
- Hagenblad, J., Abbey-Lee, R., Bashford, L., Vanhala, T., & Leino, M. W. (2024). The introduction history of *Hordeum vulgare* var. *nudum* (naked barley) into Fennoscandia. *Vegetation History and Archaeobotany*, Vol. 33, 237–245. <https://doi.org/10.1007/s00334-023-00925-1>
- Hayward, L., Wedel, A., & McSweeney, M. B. (2019). Acceptability of beer produced with dandelion, nettle, and sage. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 18, 100180. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2019.100180>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2002). *NTE INEN 2 323:2002. Bebidas alcohólicas. Cerveza. Determinación de la acidez total*. INEN.
<https://es.scribd.com/document/471652987/2323-acdez-en-la-cerveza-norma-ENEN>
- International Organization for Standardization [ISO]. (2004). *ISO 4120:2004 Sensory analysis — Methodology — Triangle test*. International Organization for Standardization.
- Jeanty, J., Bouby, L., Bonhomme, V., Balfourier, F., Debiton, C., Dham, C., Ivorra, S., Ros, J., & Evin, A. (2023). Barley systematics and taxonomy foreseen by seed morphometric variation. *PloS one*, 18(5), e0285195. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285195>
- Kaur, A., Purewal, S. S., Phimolsiripol, Y., & Bangar, S. P. (2024). Unraveling the hidden potential of barley (*Hordeum vulgare*): An important review. *Plants*, 13(17), 2421.
<https://doi.org/10.3390/plants13172421>

- Kimani, B. G., Kerekes, E. B., Szebenyi, C., Krisch, J., Vágvölgyi, C., Papp, T., & Takó, M. (2021). In Vitro Activity of Selected Phenolic Compounds against Planktonic and Biofilm Cells of Food-Contaminating Yeasts. *Foods*, *10*(7), 1652. <https://doi.org/10.3390/foods10071652>
- Klimczak, K., Cioch-Skoneczny, M., & Poreda, A. (2024). Factors affecting beer quality during storage – a review. *Acta Universitatis Cibiniensis, Series E: Food Technology*, *28*(1), 1–20. <https://doi.org/10.2478/auaft-2024-0001>
- Kondić, D., Čerenak, A., Košir, I. J., Ocvirk, M., Krmpot, T., & Đurić, G. (2021). Morphological and biochemical characterization of wild hop (*Humulus lupulus* L.) populations from Banja Luka area (Bosnia and Herzegovina). *Agronomy*, *11*(2), 239. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020239>
- 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. <https://doi.org/10.1007/S13197-020-04237-4>
- Kunze, W. (2004). *Technology Brewing and Malting (3rd ed.)*. VLB Berlin.
- Kunze, W. (2014). *Technology Brewing and Malting (5th ed.)*. VLB Berlin. https://www.vlb-berlin.org/sites/default/files/2018-02/TechnologyBrewingMalting2014_Content.pdf
- Langlade López M. C. (2025). *Cerveza artesanal IPA con Pino Romerón*. Universidad de los Andes. <https://hdl.handle.net/1992/76665>
- Lawless, H. T., & Heymann, H. (2010). *Sensory evaluation of food: Principles and practices* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6488-5>
- Leles, N. R., Sato, A. J., Rufato, L., Jastrombek, J. M., Marques, V. V., Missio, R. F., Fernandes, N. L. M., & Roberto, S. R. (2023). Performance of hop cultivars grown with artificial lighting under subtropical conditions. *Plants*, *12*(10), 1971. <https://doi.org/10.3390/plants12101971>
- Loviso, C. L., & Libkind, D. (2019). Synthesis and regulation of flavor compounds derived from brewing yeast: esters and higher alcohols. *Revista Argentina de Microbiología*, *51*(4), 386–397. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2018.08.006>
- Lukinac, J., & Jukić, M. (2022). Barley in the Production of Cereal-Based Products. *Plants*, *11*(24), 3519. <https://doi.org/10.3390/plants11243519>
- Martínez-Valverde, I., Periago, M. J., & Ros, G. (2000). Significado nutricional de los compuestos fenólicos de la dieta. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, *50*(1), 5-18. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222000000100001&lng=es&tlng=es.
- Mubai, N. H., de Oliviera Monte, M., de Lima Costa, I. H., Colussi, R., Levien Vanier, N. & Cardoso Elias, M. (2025). Nutritional composition and phenolic compounds in barley (*Hordeum*

- vulgare L.): A review of the effects of drying, storage, and processing. *Food Research International*, 219, 116973. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116973>
- Ordóñez Amoroso, A. (2020). *Estudio de factibilidad de la importación de materias primas para cerveceros artesanales a través de la Asociación de Cerveceros del Ecuador [Trabajo de Titulación, Universidad del Azuay]*. Dspace UDA. <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9681>
- Otero Ortiz, L. (2010). *Sustitución parcial de lúpulo por harina de coca (Erythroxylum coca) en la elaboración de cerveza tipo Ale*. Repositorio UNAMBA. <https://repositorio.unamba.edu.pe/items/6126a4c8-fbc3-4501-a56b-8c3efccab1c0>
- Pahl, R., Meyer, B., & Biurrún, R. (2016). Wort and wort quality parameters. En C. W. Bamforth (Ed.), *Brewing materials and processes: A practical approach to beer excellence* (pp. 113–121). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799954-8.00006-X>
- Piotti, M. A. (2024). *Análisis de tratamiento y/o aprovechamiento del bagazo de cebada en cervecerías de San Carlos de Bariloche*. Universidad Nacional de Río Negro. https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/RIDUNRN_9de3b86152167bbaa8b226670c9dc09f
- Pires, E. J., Teixeira, J. A., Brányik, T., & Vicente, A. A. (2014). Yeast: The soul of beer's aroma - a review of flavour-active esters and higher alcohols produced by brewing yeast. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98, 1937–1949. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5470-0>
- Postigo, V., Mauro, L., Diaz, T., Saiz, R., Arroyo, T. y García, M. (2024). Ingredientes autóctonos para la producción de cerveza artesanal. *Fermentación*, 10(5), 225. <https://doi.org/10.3390/fermentation10050225>
- Roberts, T. R. (2016). Hops. En C.W. Bamforth (Ed.), *Brewing Materials and Processes: A Practical Approach to Beer Excellence* (pp. 47-75). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799954-8.00003-4>
- Rojas Abad, S. E. (2023). *Estudio del reemplazo del lúpulo (Humulus Lupulus) mediante hierbas aromáticas en la elaboración de cerveza artesanal tipo Pale Ale*. Universidad de Cuenca. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/42526>
- Rojas, R., Bustamante, B., Bauer, J., Fernández, I., Albán, J., & Lock, O. (2003). Antimicrobial activity of selected Peruvian medicinal plants. *Journal of Ethnopharmacology*, 88(2–3), 199–204. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(03\)00212-5](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(03)00212-5)
- Romero Corral, R. A., Valladares, G. S., & Quinatoa Lema, G. M. (2023). Sustitución parcial de lúpulo (*Humulus lupulus*) por semillas de cáñamo (*Cannabis sativa ssp. sativa*) en

- elaboración de cerveza artesanal tipo Brown Ale. *Polo del Conocimiento*, 8(9), 1294–1314. <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/6082>
- Rossini, F., Virga, G., Loreti, P., Iacuzzi, N., Ruggeri, R., & Provenzano, M. E. (2021). Hops (*Humulus lupulus* L.) as a novel multipurpose crop for the Mediterranean region of Europe: Challenges and opportunities of their cultivation. *Agriculture*, 11(6), 484. <https://www.mdpi.com/2077-0472/11/6/484>
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2022). *NTE INEN 2262: Cerveza*. Instituto Ecuatoriano de Normalización. https://infoalimentario.com/wp-content/uploads/2022/09/pc_nte_inen_2262_2r.pdf
- Spanic, V., Lalic, Z., Berakovic, I., Drenjancevic, L., Jukic, G., & Varnica, I. (2025). Significant changes in morphological traits of 422 barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties with different registration. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 94(2), 317–330. <https://doi.org/10.32604/phyton.2025.058201>
- Suárez Díaz, M. (2013). *Cerveza: Componentes y Propiedades*. Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo. <http://hdl.handle.net/10651/19093>
- Suárez-Estrella, D. P. (2019). *Germination as a bio-technological process to enhance the use of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) in Cereal-based products* [Tesis doctoral, Università degli Studi di Milano]. Air Unimi. <https://air.unimi.it/handle/2434/646338>
- Thesseling, F. A., Bircham, P. W., Mertens, S., Voordeckers, K., & Verstrepen, K. J. (2019). A Hands-On Guide to Brewing and Analyzing Beer in the Laboratory. *Current protocols in microbiology*, 54(1), e91. <https://doi.org/10.1002/cpmc.91>
- Torres Rodríguez, D. C., & Bohórquez Castaño, D. (2017). *Sustitución parcial del lúpulo (Humulus lupulus) por cidrón (Aloysia citrodora) en la elaboración de cerveza artesanal*. Repositorio LaSalle. <https://ciencia.lasalle.edu.co/items/1bf7db6c-fe64-4579-aa38-6d8ced764152/full>
- Tyl, C., Sadler, G.D. (2017). pH and Titratable Acidity. Nielsen, S.S. (Ed.) *Food Analysis*. Food Science Text Series. Springer, Cham. pp. 389-406. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45776-5_22
- USDA Agricultural Research Service. (2020). *Humulus germplasm*. National Clonal Germplasm Repository – Corvallis. <https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/corvallis-or/national-clonal-germplasm-repository/docs/ncgr-corvallis-humulus-germplasm/>
- Villacís Sánchez, M. C. (2024). *Evaluación de las características tecnológicas de trigos y cebadas cultivados en Cañar para la elaboración de bebidas no alcohólicas derivadas de la malta*. Universidad del Azuay [Tesis de Pregrado]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/15966>

- Wang, J., Chen, Y., Zhang, Y., Zhang, Y., Ai, Y., Feng, Y., Moody, D., Diggie, A., Damon, P., & Rengel, Z. (2021). Phenotyping and validation of root morphological traits in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Agronomy*, 11(8), 1583. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081583>
- Wasmuht, I. (2023). Relevant process steps influencing wort and beer composition and its quality: a review. *BrewingScience*, Vol. 76. <https://doi.org/10.23763/BrSc23-15wasmuht>
- World Bank. (2023). *UN Comtrade database: Ecuador – Imports of hops (HS 1210, 130213)*. World Integrated Trade Solution (WITS). <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2023/tradeflow/Imports/partner/WLD/product/130213>
- Xu, M., Fralick, D., Zheng, J. Z., Wang, B., Tu, X. M., & Feng, C. (2017). The Differences and Similarities Between Two-Sample T-Test and Paired T-Test. *Shanghai archives of psychiatry*, 29(3), 184-188. <https://doi.org/10.11919/j.issn.1002-0829.217070>
- Żbik, K., Górka-Horczyczak, E., Onopiuk, A., Kurek, M. & Zalewski, M. (2023). Vacuum and convection drying effects on volatile compounds profile and physicochemical properties of selected herbs from Lamiaceae family. *Eur Food Res Technol* 249, 2569-2581. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04309-7>
- Zeas Bernal, D. A. (2021). *Elaboración de una cerveza artesanal tipo Ale sustituyendo parcialmente la malta por lenteja (*Lens culinaris*) y el lúpulo por hierbabuena (*Mentha spicata*)*. Universidad Agraria del Ecuador. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/ZEAS%20BERNAL%20DIEGO%20ARMANDO.pdf>. [CIA Uagraria](https://cia.uagraria.edu.ec)

Anexos

Anexo 1. Formulario de convocatoria y preselección.

1a

Convocatoria al Panel Sensorial de Cerveza

Hola,

Gracias por tu interés en participar en el panel sensorial que evaluará cervezas elaboradas con diferentes ingredientes.

El objetivo es seleccionar un grupo de personas para formar un **panel sensorial semientrenado**, el cual participará en sesiones de catación de cerveza a lo largo del semestre.

El proceso comenzará con una **fase de PRE-SELECCIÓN** luego de la cual, se elegirán los **30 mejores panelistas**.

Durante este proceso se requiere:

- Disponibilidad para asistir en horarios coordinados
- No presentar restricciones médicas hacia ninguno de los compuestos de la cerveza, incluyendo gluten.

La información recopilada será utilizada únicamente con fines académicos.

* Indica que la pregunta es obligatoria

1b

Correo *

Tu dirección de correo electrónico _____

Nombre y Apellido *

Tu respuesta _____

Carrera

Tu respuesta _____

1c

Ciclo *

- Segundo
- Cuarto
- Quinto
- Sexto
- Séptimo
- Octavo
- Décimo
- Personal de la U

¿Te gusta la cerveza? *

- Si
- No

¿Tienes alguna alergia alimentaria? *

Tu respuesta _____

1d

¿Tienes alguna restricción de salud para el consumo de alcohol, azúcar o gluten? *

- Si
- Ninguna

¿Tienes disponibilidad para asistir a sesiones presenciales entre semana? *

(Se coordinarán según los horarios)

- En la mañana
- En la tarde
- Tengo pocas horas huecas
- No tengo disponibilidad

Número de teléfono *

Tu respuesta _____

Enviar

Borrar formulario



Anexo 2. Ficha de entrenamiento y selección.

ENTRENAMIENTO DE PANELISTAS

Nombre: _____ Fecha: _____

PRUEBA 1: RANKING DE AMARGOR

Se le presentarán 7 muestras codificadas que contienen diferentes niveles de amargor. Pruebe las muestras en el orden que prefiera, y ordénelas desde la que perciba como MENOS amarga hasta la MÁS amarga escribiendo los códigos en los espacios.

- Puede volver a probar las muestras cuantas veces sea necesario.
- Enjuague su boca con agua entre muestras.

Menos amarga _____ Más amarga

PRUEBA 2: TRIANGULAR

Se le presentarán tres muestras codificadas de bebida. Dos de las muestras son iguales y una es diferente. Pruebe las muestras e identifique cuál considera diferente de las otras dos. Marque el código de la muestra diferente.

- Puede volver a probar las muestras cuantas veces sea necesario.
- Enjuague su boca con agua entre muestras.

La muestra diferente es: _____

PRUEBA 3: IDENTIFICACIÓN DE AROMAS

Se le presentarán tres frascos codificados, cada uno con un aroma diferente. Abra un frasco y huela suavemente el aroma. Intente identificar o describir el aroma percibido. Cierre el frasco antes de continuar con el siguiente. Escriba a continuación a qué aroma cree que corresponde cada muestra o describa el olor percibido.

449	
132	
459	

Comentarios:

Anexo 3. Ficha de catas.

Tanda/Especie/Modelo:

FICHA DE CATA SENSORIAL

Nombre: _____ Fecha: _____

Se le presentarán tres muestras codificadas de cerveza. Dos muestras son iguales y una es diferente. Pruebe las muestras de izquierda a derecha. Puede volver a probar las muestras cuantas veces lo considere necesario. Enjuague su boca con agua entre muestras.

Muestra 1: _____ Muestra 2: _____ Muestra 3: _____

1. Identifique cuál muestra es diferente de las otras dos. La muestra diferente es: _____

2. ¿Qué factores son diferentes? Aroma Sabor Sensación en la boca

3. ¿La muestra _____ le pareció agradable? _____

Anexo 4. Tabla de distribución binomial aplicada en el análisis de resultados sensoriales.

Table 4.3 Minimum numbers of correct judgments^a to establish significance at probability levels of 5 and 1% for paired difference and duo-trio tests (one tailed, $p = 1/2$) and the triangle test (one tailed, $p = 1/3$)

Paired difference and duo-trio tests			Triangle test		
Number of trials (<i>n</i>)	Probability levels		Number of trials (<i>n</i>)	Probability levels	
	0.05	0.01		0.05	0.01
5	5	–	3	3	–
6	6	–	4	4	–
7	7	7	5	4	5
8	7	8	6	5	6
9	8	9	7	5	6
10	9	10	8	6	7
11	9	10	9	6	7
12	10	11	10	7	8
13	10	12	11	7	8
14	11	12	12	8	9
15	12	13	13	8	9
16	12	14	14	9	10
17	13	14	15	9	10
18	13	15	16	9	11
19	14	15	17	10	11
20	15	16	18	10	12
21	15	17	19	11	12
22	16	17	20	11	13
23	16	18	21	12	13
24	17	19	22	12	14
25	18	19	23	12	14
26	18	20	24	13	15
27	19	20	25	13	15
28	19	21	26	14	15
29	20	22	27	14	16
30	20	22	28	15	16
31	21	23	29	15	17