



Composición aromática de la cerveza. Influencia de las materias primas y del proceso de elaboración

Trabajo Fin de Máster

Curso: 2024/2025

Alumno: Patricio Javier Balarezo Espin

Tutores: Isabel Caballero Caballero

Carlos Antonio Blanco Fuentes

Máster en Calidad, Desarrollo e Innovación de Alimentos

E.T.S. Ingenierías Agrarias

Campus Palencia

Universidad de Valladolid

Índice

1	Introducción	1
1.1	Composición aromática de la cerveza.....	2
2	Materias primas y su influencia en la composición aromática.....	7
2.1	Lúpulo	7
2.2	Malta	8
2.3	Levaduras.....	9
2.4	Agua	10
3	Influencia del proceso de elaboración en el perfil aromático de la cerveza	11
3.1	Molienda.....	12
3.2	Maceración	12
3.3	Cocción del mosto	12
3.4	Fermentación	13
3.5	Maduración	14
4	Métodos de análisis de la composición aromática en cerveza	14
4.1	Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)	14
4.2	Microextracción en fase sólida (SPME).....	15
4.3	Olfatometría acoplada a GC (GC-O) y análisis sensorial	15
4.4	Métodos espectroscópicos y análisis quimiométrico.....	15
4.5.	Uso de la Inteligencia Artificial	16
5	Evolución del perfil aromático durante el almacenamiento	17
5.1	Cambios químicos durante el envejecimiento	17
5.2	Influencia del tipo de envase: botella vs lata	17
5.3	Factores que aceleran la pérdida de frescura	18
6	Tendencias e innovación en la mejora del perfil aromático de las cervezas	19
6.1	Nuevas variedades de lúpulo y maltas especiales	19
6.2	Uso de levaduras no convencionales.....	20
6.3	Incorporación de adjuntos	21
7	Conclusiones	23
8	Bibliografía.....	23
9	Anexo.....	31

Resumen

El presente Trabajo Fin de Máster (TFM) aborda la composición aromática de la cerveza, centrándose en la influencia de las materias primas y del proceso de elaboración sobre el perfil sensorial del producto final. Se analizan las principales familias de compuestos volátiles responsables del aroma de la cerveza, incluyendo ésteres, alcoholes superiores, aldehídos, cetonas, compuestos azufrados y fenólicos. También se estudia el papel del lúpulo, la malta, las levaduras, el agua y los adjuntos, evaluando su aporte específico de precursores aromáticos y sus transformaciones a lo largo de las distintas etapas del proceso productivo: molienda, maceración, cocción, fermentación, maduración y almacenamiento. Asimismo, se examinan los cambios químicos que ocurren a lo largo de la vida útil, con especial atención a la formación de compuestos de envejecimiento y a la influencia del tipo de envase. Finalmente, se presentan las tendencias e innovaciones en el perfil aromático de nuevas cervezas, incluyendo el uso de maltas especiales, lúpulos con perfiles terpenoides diferenciados, levaduras no convencionales y adición de compuestos funcionales. El trabajo muestra resultados de estudios científicos recientes, con el fin de proporcionar una visión amplia y actualizada sobre los factores que determinan la complejidad y estabilidad aromática de la cerveza.

Palabras clave

Cerveza, aroma, perfil aromático, compuestos volátiles, materias primas, proceso de elaboración, almacenamiento.

Abstract

This work addresses the aromatic composition of beer, focusing on the influence of raw materials and the brewing process on the sensory profile of the final product. The main families of volatile compounds responsible for beer aroma are analysed, including esters, higher alcohols, aldehydes, ketones, sulfur and phenolic compounds. It also studied the role of hops, malt, yeast, water and adjuncts, evaluating their specific contribution of aromatic precursors and their transformation throughout the different stages of the production: milling, mashing, wort boiling, fermentation, maturation, and storage. In addition, the chemical changes occurring during beer aging are examined, with special attention to the formation of staling compounds and the influence of the packaging type. Finally, trends and innovations in aromatic profile of new beers are presented, including the use of specialty malts, hops with differentiated terpenoid profiles, non conventional yeasts and additions of functional compounds. The work presents the results of recent scientific studies to provide a broad and updated overview of the factors that determine the aromatic complexity and stability of beer.

Keywords

Beer, aroma, aromatic composition, volatile compounds, raw materials, brewing process, storage

1 Introducción

La cerveza es una de las bebidas fermentadas más antiguas y consumidas del mundo, con presencia en distintas culturas. Su popularidad se debe no solo a su valor cultural y económico, sino también a su complejidad sensorial, en la que el aroma desempeña un papel fundamental. Esta complejidad surge de la combinación de materias primas y de un proceso de elaboración controlado que genera compuestos aromáticos específicos (Humia et al., 2019).

En la Unión Europea (2025), la cerveza se define como una bebida obtenida por fermentación alcohólica de un mosto de cebada u otros cereales, lúpulo y agua potable, con o sin adición de cereales no malteados o azúcares, y cuyo grado alcohólico suele oscilar entre el 0,5 % y el 12 % en volumen.

En España, el Real Decreto 678/2016 regula la elaboración, comercialización y etiquetado de la cerveza, clasificando las cervezas según el extracto seco, el grado alcohólico y el uso de aditivos permitidos (BOE, 2016). Esta normativa refuerza la importancia de los ingredientes básicos en la calidad del producto y proporciona el marco legal para la innovación en el sector.

En las últimas décadas, el auge de las cervezas artesanales ha impulsado el uso de materias primas más diversas y procesos menos automatizados, lo que permite obtener perfiles aromáticos diferenciados y de mayor complejidad frente al producto industrial (Postigo et al., 2024; Zheplinska et al., 2019). Los compuestos responsables de esta riqueza aromática incluyen ésteres, alcoholes superiores, aldehídos, ácidos, terpenos y fenoles, cuya concentración depende de los ingredientes y de las condiciones de elaboración (Kumar et al., 2023; Olaniran et al., 2017).

Durante el malteado de la cebada se generan aldehídos y pirazinas que aportan notas a caramelo, pan o frutos secos, mientras que durante la fermentación las levaduras transforman los precursores del mosto en ésteres y alcoholes superiores con matices frutales, florales y especiados (Prado et al., 2021; Prado et al., 2023). Por su parte, el lúpulo contribuye con terpenos, tioles y sesquiterpenos liberados en la cocción y en el *dry-hopping*, responsables de los aromas herbales, cítricos o tropicales característicos de estilos modernos como las IPA (Santana et al., 2024; Wang et al., 2024).

La estabilidad aromática de la cerveza durante el almacenamiento es un factor decisivo para mantener su calidad. Procesos como la oxidación o la exposición al calor favorecen la formación de compuestos indeseados, entre ellos furfural y aldehídos de Strecker, responsables de notas a cartón o papilla (de Lima et al., 2023; Ferreira, 2021). Por ello, resulta fundamental controlar las condiciones de conservación para prolongar la vida útil sin deterioro sensorial.

Este trabajo analiza la composición aromática de la cerveza mediante una revisión bibliográfica, centrándose en cómo las materias primas y las etapas del proceso de elaboración influyen en la formación de compuestos volátiles. También se abordan los principales mecanismos de generación e interacción de estos compuestos, basándose en estudios científicos recientes.

1.1 Composición aromática de la cerveza

La cerveza es una matriz compleja que contiene numerosos compuestos aromáticos volátiles (CAV), entre ellos alcoholes superiores, ésteres, aldehídos, ácidos, cetonas, fenoles y terpenos (Tabla 1), que determinan la calidad sensorial y la aceptación del consumidor (Loviso y Libkind, 2019; Tocci et al., 2023). Su concentración depende de factores como el tipo de levadura, la composición del mosto, la variedad de malta y adjuntos, así como de las condiciones de fermentación, maduración y almacenamiento (Bortoleto y Gomes, 2022; Herkenhoff et al., 2024).

Ésteres

Los ésteres se forman durante la fermentación a partir de alcoholes superiores y ácidos orgánicos, un proceso catalizado por enzimas como las alcohol acetiltransferasas (AAT) y proporcionan a la cerveza aromas frutales y florales. Ejemplos característicos incluyen el acetato de isoamilo (asociado a plátano), hexanoato de etilo (manzana verde), y octanoato de etilo (frutas tropicales) (Herkenhoff et al., 2024; Tocci et al., 2023).

Una revisión reciente comparó 160 cervezas y 904 vinos, identificando 42 compuestos volátiles comunes, aunque en distintas concentraciones. En cerveza, el acetato de etilo presentó un valor de actividad odorante (OAV) de 4700, frente a 14 000 en vino. Otros ésteres como hexanoato de etilo, 2-metilbutanoato de etilo y 3-metilbutanoato de etilo también fueron más abundantes en vino, lo que explicaría su carácter afrutado. Las pruebas sensoriales con modelos aromáticos reconstituidos confirmaron que, al elevar

los niveles de estos ésteres en cerveza, la muestra era percibida sensorialmente como vino en un 70 % de los casos (Wang et al., 2024).

Alcoholes superiores

Los alcoholes superiores o fusel se forman en la fermentación por la ruta de Ehrlich, que transforma aminoácidos en alcoholes mediante transaminación y descarboxilación. Entre los más comunes destacan el isoamílico (leucina), 2-feniletanol (fenilalanina), isobutanol y n-propanol. En niveles moderados aportan notas florales y frutales agradables, pero en exceso generan sensaciones ásperas o notas a solventes. Su síntesis depende de la cepa de levadura, la disponibilidad de nitrógeno y las condiciones de fermentación, especialmente la temperatura y la tasa de crecimiento celular (Olšovská et al., 2024; Pires et al., 2014).

En un estudio reciente llevado a cabo con cervezas de sorgo, Tokpohozin et al. (2019) demostraron que ciertas cepas de *S. cerevisiae* pueden incrementar la producción de alcoholes como isoamílico, isobutanol y 2-feniletanol. Estas moléculas aportan aromas afrutados, florales o vinosos en niveles moderados, pero resultan agresivos si se acumulan en exceso. La elección de la cepa, el contenido de nitrógeno asimilable y las condiciones de fermentación son factores determinantes en la producción de estos compuestos (Oladokun et al., 2017; Tokpohozin et al., 2019).

Aldehídos

Los aldehídos se producen en la fermentación y por oxidación durante el almacenamiento de la cerveza. Entre los aldehídos presentes en la cerveza se encuentra el acetaldehído, que aporta notas a manzana verde o hierba, aunque no se considera defecto por debajo de 20–25 mg/L (Bortoleto et al., 2022; Herkenhoff et al., 2024). El metional y el fenilacetaldehído, con umbrales muy bajos (0.43 y 5.2 µg/kg), generan aromas a patata cocida y miel. El uso de maltas especiales intensifica su formación: la caramelizada eleva el metional hasta 2.3 µg/kg y la tostada el fenilacetaldehído hasta 20 µg/kg, evidenciando el efecto del tratamiento térmico en estos compuestos (Piornos et al., 2019; Reglitz et al., 2022).

Durante el almacenamiento o exposición al oxígeno pueden desarrollarse otros aldehídos como el trans-2-nonenal generando aromas rancios o a cartón mojado. Su formación es lenta pero progresiva y constituye un marcador clave en la pérdida de frescura en cervezas embotelladas o enlatadas (Doorn et al., 2021; Mikyška et al., 2023).

Ácidos orgánicos volátiles

Los ácidos orgánicos volátiles se forman principalmente por la actividad metabólica de levaduras y, en algunos casos, bacterias lácticas e influyen de forma decisiva en el perfil sensorial de la cerveza. Entre ellos destacan el isovalérico, hexanoico y octanoico, que pueden aportar notas frutales, agrias o incluso a queso rancio, deseables en cervezas *lambic* o *sour ales*, pero considerados defectos en estilos convencionales (Correia et al., 2023; Herkenhoff et al., 2024).

Su concentración depende de la cepa de levadura, el oxígeno disuelto y la presencia de microorganismos no-Saccharomyces. Su exceso puede indicar fallas en el control de pH, temperatura o contaminación microbiana durante la fermentación o maduración (Mikyška et al., 2024a).

Cetonas

Dentro de las cetonas volátiles, destaca el diacetilo debido a su bajo umbral sensorial y aroma característico a mantequilla. Se forma a partir de α -acetoácidos liberados por la levadura y, si no se reduce adecuadamente durante la maduración, constituye un defecto común en cervezas tipo *lager* (Alves et al., 2020; Piornos et al., 2023).

Su eliminación requiere una fermentación activa que lo convierta en compuestos inodoros como el 2,3-butanodiol. Kandyliis et al. (2021) demostraron que temperaturas bajas (5–10 °C) y el uso de levaduras inmovilizadas en cáscara de coco reducen eficazmente las concentraciones de diacetilo y 2,3-pentanodiona por debajo de los umbrales sensoriales (0,1–0,4 mg/L). En cambio, temperaturas elevadas (15–25 °C), fermentaciones incompletas o almacenamiento prolongado favorecen su acumulación, lo que resalta la importancia del control térmico y del estado fisiológico de la levadura (Kandyliis et al., 2021).

Terpenos y compuestos del lúpulo

Los terpenos y otros compuestos volátiles del lúpulo, como el linalool, geraniol y β -citronelol, aportan aromas florales, cítricos y herbales, característicos de estilos muy aromáticos como las IPA. Aunque provienen del lúpulo, su impacto depende también de la biotransformación realizada por ciertas levaduras (Tocci et al., 2023; Wang et al., 2024). Algunas técnicas como el *dry-hopping* permiten extraer estos compuestos en frío sin añadir amargor, mientras que nuevas variedades de lúpulo, como Saaz Shine o Mosaic, destacan por su riqueza en monoterpenos oxigenados (Mikyška et al., 2024b; Monacci et al., 2024).

Estudios recientes han ampliado el conocimiento sobre el contenido de estos

compuestos en la cerveza y su influencia en las características del producto. Williams et al. (2023) analizaron 53 terpenoides en 34 cervezas comerciales mediante HS-SPME-GC-MS, encontrando concentraciones totales entre 83 y 5525 µg/L, con β -mirceno, α -felandreno, linalool, α -terpineol, citronelol y geraniol como compuestos más abundantes. Además, observaron que mientras monoterpenos como β -mirceno son inestables y tienden a degradarse durante el almacenamiento, compuestos oxigenados como linalool y eucaliptol muestran mayor estabilidad, lo que refuerza su papel en la persistencia aromática de la cerveza (ver Tabla 1).

Tabla 1. Principales compuestos volátiles presentes en la cerveza

Compuesto volátil	Descriptor aromáticos	Concentración en cerveza (mg/L)	Umbral sensorial (mg/L)	Tipo de cerveza / Malta o Adjunto / Levadura	Referencias
Alcoholes superiores					
2-Feniletanol	Floral (rosa), dulce	4.0 – 5.3	40 – 125	Ale / Malta base de cebada / <i>S. cerevisiae</i>	Monacci et al., 2024; Medina et al., 2023; Olaniran et al., 2017
Isobutanol	Alcohol, disolvente	0.2 – 0.5	80 – 200	Ale / Maltas de cebada y centeno / <i>S. cerevisiae</i>	Tocci et al., 2023; Medina et al., 2023
Alcohol Isoamílico	Alcohol, plátano, vinoso	25 – 123	50 – 75	IPA / Adjuntos de maíz o sorgo / Levadura ale (<i>S. cerevisiae</i>)	Troilo et al., 2019; Kobayashi et al., 2008; Medina et al., 2023
1-Pentanol	Alcohol, verde	3.0 – 5.0	64	Blond Ale / Malta base de cebada / <i>S. cerevisiae</i>	Medina et al., 2023; Monacci et al., 2024
1-Propanol	Disolvente	5 – 12	700 – 800	Ale / Malta base de cebada / <i>S. cerevisiae</i>	Monacci et al., 2024
Isobutanol	Disolvente, vino blanco	0.27 – 0.31	200	Pilsner / Malta Pilsner / <i>S. pastorianus</i>	Tocci et al., 2023
2-Metilpropanol	Solvente, afrutado	12 – 18	65	Ale / Malta clara de cebada / <i>S. cerevisiae</i>	Ferreira, 2021
Cetonas					
Diacetilo (2,3-butanodiona)	Mantequilla, cremoso	0.1 – 0.3	0.1	Lager / Malta centeno / <i>S. pastorianus</i>	Tocci et al., 2023; Morales-Toyo, 2018
3-hidroxi-2-butanona (acetoin)	Mantecoso, suave	0.2 – 1.2	150	Lager / Malta Pilsner / <i>S. pastorianus</i>	Kishimoto et al., 2018; Ferreira, 2021
2-pentanona	Éter, afrutado	0.05 – 0.08	0.04	Pilsner / Malta base / <i>S. pastorianus</i>	Kishimoto et al., 2018
3-octanona	Grasa, champiñón	0.03 – 0.07	0.02	Ale / almidón de maíz / <i>S. cerevisiae</i>	Kishimoto et al., 2018
2-heptanona	Cartón Mojado, papel mojado	0.015 – 0.04	0.01	Ale / trigo sin maltear / <i>S. cerevisiae</i>	Kishimoto et al., 2018
Compuestos azufrados					
Dimetil sulfuro (DMS)	Maíz cocido, vegetal	0.02 – 0.09	0.03	Pilsner / Malta Pilsner / <i>S. pastorianus</i>	Tocci et al., 2023; Kishimoto et al., 2018
Metanotiol	Col, azufrado	0.001 – 0.005	0.0005	Ale / Malta base: cebada malteada / <i>S. cerevisiae</i>	Fritsch y Schieberle, 2005
Sulfuro de hidrógeno	Huevos podridos	0.002 – 0.007	0.001	Lager / Malta Pilsner / <i>S. pastorianus</i>	Piornos et al., 2023
S-metiltioacetato	Azufrado, cebolla	0.003 – 0.009	0.002	Ale / Malta oscura / <i>S. cerevisiae</i>	Kishimoto et al., 2018

Metionol	Cebolla, azufrado	0.01 – 0.03	0.008	Ale / Malta base de cebada / <i>S. cerevisiae</i>	Kishimoto et al., 2018
Fenoles					
4-vinilguayacol	Clavo de olor, especiado	0.3 – 0.8	0.3	Weissbier / Malta de trigo / <i>S. cerevisiae</i>	Medina et al., 2023; Ferreira, 2021
Eugenol	Clavo de olor, dulce, medicinal	0.01 – 0.05	0.01	Ale / Adjuntos botánicos (clavo de olor) / <i>S. cerevisiae</i>	Fritsch y Schieberle, 2005
Guayacol	Ahumado, medicinal	0.02 – 0.04	0.02	Stout / Maltas tostadas (chocolate/black) / <i>S. cerevisiae</i>	Kishimoto et al., 2018
4-etilfenol	Astringente, medicinal	0.1 – 0.4	0.12	Lambic / Malta de cebada / Levaduras salvajes (<i>Brettanomyces</i> , <i>Pediococcus</i>)	Ferreira, 2021
4-etilguayacol	Ahumado, fenólico	0.05 – 0.2	0.03	Stout / Malta tostada / <i>Brettanomyces</i>	Ferreira, 2021
Lactonas					
γ -nonalactona	Coco, afrutado	0.01 – 0.03	0.02	Ale / Malta de cebada malteada ligera / <i>S. cerevisiae</i>	Fritsch y Schieberle, 2005
γ -decalactona	Melocotón, dulce	0.005 – 0.010	0.004	Ale / Malta de cebada malteada ligera / <i>S. cerevisiae</i>	Fritsch y Schieberle, 2005
δ -octalactona	Coco, dulce	0.004 – 0.01	0.003	Ale / Malta de cebada malteada ligera / <i>S. cerevisiae</i>	Fritsch y Schieberle, 2005
Terpenos					
Linalool	Floral, cítrico	0.1 – 0.3	0.005	IPA / Lúpulo Cascade (lupulado en frío) / <i>S. cerevisiae</i> (ale)	Kishimoto et al., 2018; Monacci et al., 2024
Geraniol	Rosa, frutal	0.2 – 0.4	0.1	PA / Lúpulos Cascade y Mosaic / <i>S. cerevisiae</i> (ale)	Fritsch y Schieberle, 2005; Monacci et al., 2024
β-Citronelol	Cítrico, floral	0.02 – 0.06	0.008	IPA / Biotransformación del geraniol a β -citronelol / <i>S. cerevisiae</i> (ale)	Takoi et al., 2010
α -humuleno	Herbal, especiado	0.01 – 0.03	0.04	Ale / Lúpulo noble (ej. Saaz, Hallertau) / <i>S. cerevisiae</i>	Fritsch y Schieberle, 2005
Myrceno	Herbal, resinoso	0.5 – 1.2	0.02	IPA / Lúpulo Cascade (lupulado en frío) / <i>S. cerevisiae</i> (ale)	Monacci et al., 2024
Ácidos orgánicos					
Ácido isobutírico	Rancio, agrio	0.1 – 0.3	0.1	Ale / Malta base de cebada / <i>S. cerevisiae</i>	Medina et al., 2023
Ácido hexanoico	Graso, ácido	0.2 – 0.8	0.2	Ale / Malta base de cebada / <i>S. cerevisiae</i>	Medina et al., 2023
Ácido octanoico	Jabón, graso	0.1 – 0.5	0.1	Ale / Malta base de cebada / <i>S. cerevisiae</i>	Ferreira, 2021
Ácido acético	Avinagrado, ácido	150 – 300	200	Cerveza ácida (sour) / Bacterias lácticas / Fermentación espontánea	Piornos et al., 2023
Ácido propanoico	Ácido, rancio	0.05 – 0.2	0.1	Ale / Malta base de cebada / <i>S. cerevisiae</i>	Ferreira, 2021
Ésteres					
Acetato de etilo	Piña, disolvente	15,300	21,000	Pilsner / Malta Pilsner / <i>S. pastorianus</i>	Kishimoto et al., 2018
Acetato de isoamilo	Banana, afrutado	1,230	724	Ale / Adjuntos de maíz o sorgo / <i>S. cerevisiae</i>	Kishimoto et al., 2018
Hexanoato de etilo	Manzana verde, frutal	119.2	163	IPA / Lúpulo Cascade / <i>S. cerevisiae</i> (ale)	Kishimoto et al., 2018

Octanoato de etilo	Afrutado, graso	70.0	2.0	IPA / Lúpulo aromático (ej. Cascade, Mosaic) / <i>S. cerevisiae</i>	Fritsch y Schieberle, 2005
Acetato de 2-feniletilo	Floral, rosa	1.5 – 2.8	10	Ale / Adjuntos (trigo, maíz) / <i>S. cerevisiae</i>	Medina et al., 2023
Butanoato de etilo	Manzana, dulce	73.1	367	Pilsner / Malta base de cebada / <i>S. pastorianus</i>	Kishimoto et al., 2018
Propionato de etilo	Fruta, manzana	96.2	N.D.	Pilsner / Malta clara de cebada / <i>S. pastorianus</i>	Kishimoto et al., 2018
2-metilbutanoato de etilo	Piña, frutal	0.21	1.1	Pilsner / Malta clara de cebada / <i>S. pastorianus</i>	Kishimoto et al., 2018
Butanoato de metilo	Afrutado, éster	1.2 – 2.3	0.4	Pilsner / Malta clara de cebada / <i>S. pastorianus</i>	Kishimoto et al., 2018

2 Materias primas y su influencia en la composición aromática

Las materias primas de la cerveza (lúpulo, malta, levadura y agua) determinan su perfil aromático, sensorial y químico. Cada ingrediente aporta precursores que, durante la elaboración, se transforman en compuestos volátiles como ésteres, alcoholes superiores, aldehídos, compuestos fenólicos y sulfurosos, formados mediante transformaciones enzimáticas, térmicas y fermentativas (Humia et al., 2019; Monacci et al., 2024).

2.1 Lúpulo

El lúpulo (*Humulus lupulus*) es esencial en la cerveza por su aporte de amargor y, cada vez más, por su papel en la aparición de perfiles aromáticos complejos. Según su contenido de α -ácidos y aceites esenciales, las variedades se clasifican en lúpulos de amargor, de aroma o mixtos. Entre los más utilizados en cervezas modernas destacan Citra, Nelson Sauvin y Amarillo, fundamentales en estilos como las IPAs por sus notas tropicales, cítricas y florales (Díaz et al., 2022; Wang et al., 2024).

Entre sus compuestos más relevantes destacan los tioles volátiles, como el 3-mercaptohexanol (3MH) y la 4-mercapto-4-metilpentan-2-ona (4MMP), asociados a maracuyá, pomelo, grosella negra y frutas tropicales (Jelley et al., 2022). Estos se encuentran en forma de conjugados no volátiles en el lúpulo y requieren de enzimas β -liasas de ciertas levaduras para liberarse durante la fermentación. Para liberar su aroma característico, requieren la acción de ciertas enzimas β -liasas producidas por algunas cepas de levadura durante la fermentación (Wang et al., 2024). Debido a su umbral

sensorial extremadamente bajo (del orden de nanogramos por litro), incluso concentraciones mínimas influyen de manera decisiva en el perfil aromático final.

Los terpenos del lúpulo, como linalol, geraniol, mirceno y humuleno, aportan notas florales, herbales, resinosas y cítricas al perfil sensorial. Durante la fermentación, compuestos como el geraniol pueden transformarse en β -citronelol, de mayor impacto aromático, gracias a la acción de ciertas levaduras. Díaz et al. (2022) señalan que el linalol no solo está presente en la cerveza final, sino que puede generar sinergias sensoriales al interactuar con otros compuestos volátiles. Además, técnicas como el *dry hopping* permiten conservar estos compuestos al evitar su pérdida por volatilización durante la cocción (Olaniran et al., 2017; Díaz et al., 2022).

El amargor característico de la cerveza proviene de los α -ácidos del lúpulo (humulona, cohumulona y adhumulona), que durante la cocción del mosto se isomerizan en iso- α -ácidos, responsables directos del sabor amargo. La proporción de cohumulona influye en la percepción sensorial: variedades como Ruslan (43,8 %) generan un amargor más áspero y persistente, mientras que Alta (19,6 %) produce un amargor más suave y equilibrado (Protsenko et al., 2020). Además, el lúpulo no solo aporta amargor, sino también compuestos aromáticos; la variedad de lúpulo utilizada, el momento de adición y su interacción con la levadura durante la fermentación determina el tipo de compuestos generados y su concentración.

2.2 Malta

En la producción artesanal, la selección de maltas busca no solo eficiencia fermentativa, sino también complejidad sensorial y diferenciación territorial. Para ello, los cerveceros emplean tanto variedades tradicionales como combinaciones innovadoras de cereales malteados y no malteados. Las maltas especiales, como caramelizadas o tostadas, aportan color y perfiles aromáticos generados por reacciones térmicas, con notas a pan horneado, frutos secos o café. Esta estrategia permite diseñar perfiles aromáticos distintivos desde la formulación del producto (Villacreces et al., 2022).

Estudios recientes muestran que el tipo e intensidad del tratamiento térmico en maltas especiales influyen directamente en la formación de compuestos aromáticos clave. Prado et al. (2021) identificaron que las condiciones de secado y tostado no solo determinan el color de la malta, sino también la concentración de aldehídos, furanos y lactonas, responsables de notas a pan, caramelo, frutos secos y cacao en la cerveza final (Chen et al., 2025; Prado et al., 2021). En este contexto también se forman

pirazinas aromáticas, como la 2-etil-3,5-dimetilpirazina, altamente potentes a nivel olfativo incluso en bajas concentraciones, que aportan aromas a galleta, cacao o café, característicos de cervezas tipo *biscuit*, chocolate o *black* (Ferreira, 2021; Prado et al., 2023).

Además de los compuestos generados por reacciones térmicas, la malta aporta biomoléculas como proteínas, polisacáridos y ácidos fenólicos, que forman estructuras coloidales complejas con impacto directo en la estabilidad sensorial de la cerveza. Estas moléculas actúan como precursores aromáticos y modifican propiedades como la viscosidad, la turbidez y la persistencia del aroma. En particular, los polisacáridos, como los β -glucanos, influyen en la percepción de cuerpo, y su peso molecular determina si su efecto es positivo o negativo sobre la calidad sensorial (Gribkova et al., 2022; Humia et al., 2019).

2.3 Levaduras

La levadura es un pilar en la elaboración cervecera, no solo por la fermentación alcohólica, sino por su intensa actividad metabólica que genera compuestos volátiles clave en el aroma y sabor (Larroque et al., 2021). Además de transformar azúcares en etanol y dióxido de carbono, produce alcoholes superiores, ésteres, compuestos fenólicos y sulfurosos, que pueden influir positiva o negativamente en el perfil sensorial según el estilo (Cao et al., 2024).

Durante la fermentación, las levaduras producen ésteres mediante la acción de acetiltransferasas, que catalizan la condensación entre ácidos orgánicos y alcoholes. Entre ellos destacan el acetato de isoamilo (banana) y el acetato de etilo (frutal, disolvente dulce), compuestos muy volátiles y detectables en bajas concentraciones. Su formación está condicionada por la cepa de levadura, la temperatura de fermentación, el oxígeno disponible, el contenido lipídico del mosto y la tasa de inoculación (Humia et al., 2019; Olaniran et al., 2017). Además, McCabe et al. (2023) demostraron que el uso de lúpulo Sultana durante la fermentación incrementa el contenido de ésteres como octanoato de etilo y decanoato de etilo hasta 700 $\mu\text{g/L}$, resaltando la influencia de las condiciones fermentativas y de los precursores del lúpulo en su producción.

Un estudio reciente de Tocci et al. (2023) evidenció que la levadura tiene mayor influencia que la malta en el perfil aromático de la cerveza. Mediante un diseño factorial que evaluó dos maltas (centeno y cebada) combinadas con tres cepas de *S. cerevisiae*, se observó que 13 compuestos volátiles fueron significativamente influenciados por la

levadura, frente a solo uno por la malta y otro por la interacción malta-levadura. Entre los compuestos afectados se incluyeron terpenoides (linalol, β -mirceno), ácidos (hexanoico, octanoico), ésteres (acetato de etilo) y alcoholes (2-feniletanol), resaltando su papel en aromas florales, afrutados y especiados y la importancia de seleccionar cuidadosamente la cepa fermentativa (Pires et al., 2014; Tocci et al., 2023).

Las levaduras también producen compuestos azufrados volátiles, como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) o el dimetil sulfuro (DMS), especialmente bajo estrés, deficiencia de nutrientes o fermentaciones incompletas; aunque algunos de estos compuestos desaparecen con la aireación o la maduración, su exceso genera defectos aromáticos como aromas a huevo podrido o maíz cocido (Ferreira, 2021; Wu et al., 2024).

En definitiva, la levadura actúa como una verdadera fábrica bioquímica que transforma los precursores del mosto en una compleja matriz aromática. La elección de la cepa y el control preciso de las condiciones de fermentación son determinantes para obtener un perfil sensorial equilibrado y característico de cada tipo de cerveza. Estudios recientes confirman que el impacto de la cepa de levadura sobre el perfil aromático puede ser incluso mayor que el del tipo de malta empleada, influyendo significativamente en la concentración de alcoholes superiores y ésteres (Aguiar-Cervera et al., 2024; Paszkot et al., 2023).

2.4 Agua

El agua, que constituye más del 90 % del volumen de la cerveza, aunque suele considerarse un ingrediente neutro, influye de forma crítica en la elaboración y en las características sensoriales finales del producto. Su composición mineral afecta a parámetros fisicoquímicos como el pH y la capacidad tampón del mosto, la extracción de compuestos volátiles de la malta y el lúpulo, y el equilibrio aromático de cada estilo de cerveza (Loviso y Libkind, 2019). Entre las sales disueltas en el agua destacan bicarbonatos, sulfatos, cloruros, de iones como sodio, calcio y magnesio. El bicarbonato, por ejemplo, eleva el pH del mosto, reduce la eficacia enzimática durante la maceración y limita la formación de compuestos aromáticos como ésteres y terpenoides; por ello, aguas con alta alcalinidad no son aptas para estilos ligeros como las Pilsner, que requieren un pH bajo para mantener un perfil sensorial nítido (Kołota et al., 2020; Santana et al., 2024).

El balance de sulfatos y cloruros en el agua influye en el perfil sensorial: los sulfatos potencian el amargor y la sequedad del lúpulo, mientras que los cloruros refuerzan el

cuerpo y la dulzura del producto final. Ejemplos clásicos son el agua blanda de Pilsen, que realza lúpulos nobles, y la rica en sulfatos de Burton-on-Trent, que intensifica el carácter seco y amargo de las Pale Ale (Ferreira, 2021; Mosher y Trantham, 2017).

3 Influencia del proceso de elaboración en el perfil aromático de la cerveza

El perfil aromático de la cerveza se determina durante todo el proceso de elaboración, donde las materias primas y condiciones como temperatura o pH influyen en la formación y transformación de compuestos volátiles como ésteres, alcoholes superiores, aldehídos y terpenos (Humia et al., 2019; Pires et al., 2014) (Figura 1).

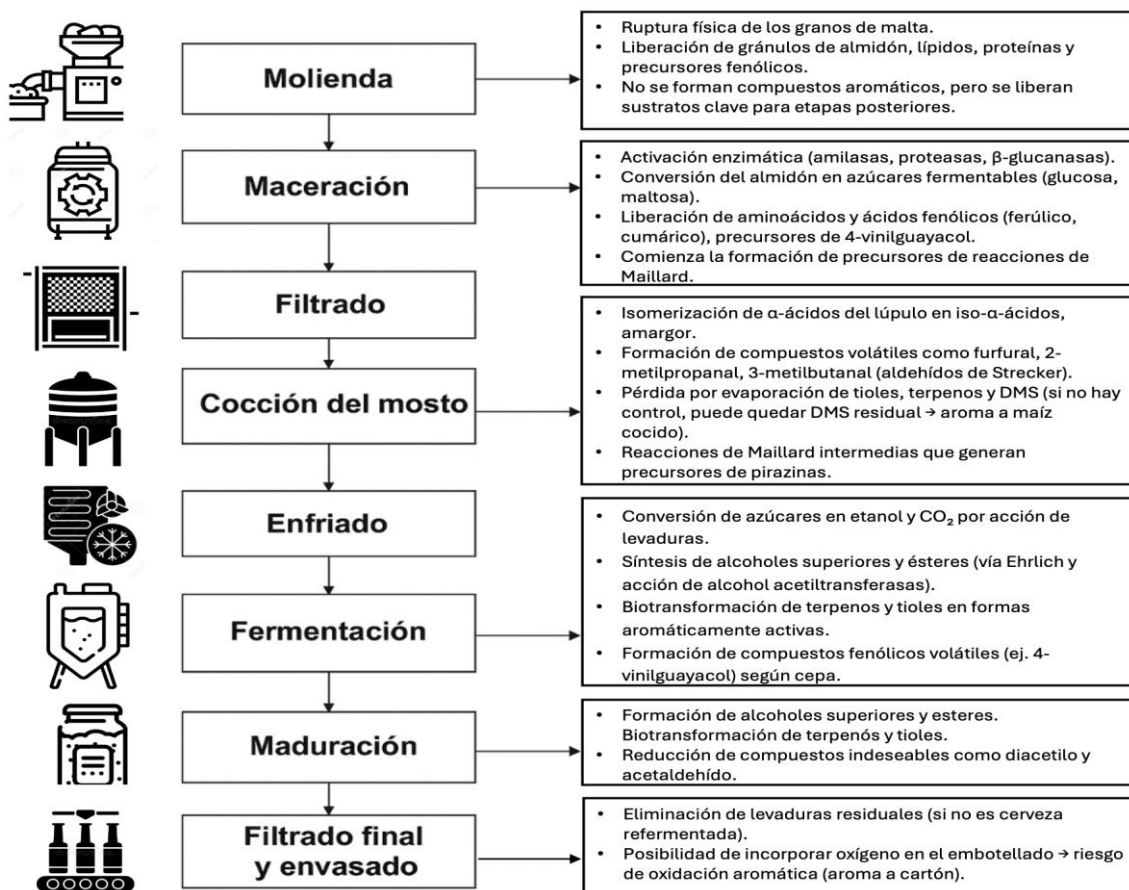


Figura 1. Esquema del proceso de elaboración de la cerveza y su impacto en el aroma

Fuente: Elaboración propia.

3.1 Molienda

Tal como se muestra en la (Figura 1), esta etapa constituye el punto de partida en la liberación de precursores aromáticos del grano de malta y facilita el acceso a compuestos como lípidos, proteínas, carbohidratos, fenólicos y aminoácidos, esenciales en las reacciones de Maillard y en la formación de alcoholes superiores y ésteres (Prado et al., 2021). En maltas especiales como Munich o Melanoidin, ya están presentes compuestos aromáticos generados por el tratamiento térmico (pirazinas, aldehídos y productos intermedios de Maillard) que aportan notas a tostado, nuez, caramelo o miel. Sin embargo, una molienda excesivamente agresiva puede volatilizar o perder estos compuestos, por lo que es clave ajustar el grado de molienda para preservar su fracción aromática sin comprometer la eficiencia extractiva (Prado et al., 2023).

3.2 Maceración

La maceración activa enzimas como amilasas y proteasas, que degradan almidones, proteínas y componentes de la pared celular, liberando azúcares, aminoácidos y ácidos fenólicos que nutren a las levaduras y participan en reacciones de Maillard, esenciales para el perfil aromático (Prado et al., 2021). También se liberan fenólicos y saponinas antioxidantes que protegen precursores sensibles al calor, y la composición química del mosto resultante influye en la formación de aldehídos y furanos volátiles (Ferreira, 2021).

La maceración post-fermentativa con virutas de madera (*wood chips*) se ha posicionado como alternativa al envejecimiento en barrica. Correia et al. (2023) evaluaron su aplicación durante siete días en cervezas tipo Ale, utilizando chips de roble americano y cerezo. El roble favoreció la formación de furfural, acetato de isoamilo y guayacol, asociados a notas de madera, vainilla y ahumado; mientras que el cerezo incrementó eugenol y geraniol, aportando matices especiados y florales. Esta técnica permite enriquecer el perfil aromático sin necesidad de procesos de maduración prolongados, abriendo nuevas posibilidades de innovación en cervezas especiales (Correia et al., 2023).

3.3 Cocción del mosto

La cocción del mosto es una etapa clave en la generación de compuestos aromáticos, favoreciendo la volatilización, transformación y formación de moléculas como linalol,

humuleno y mirceno, que influyen en el carácter floral y herbal de la cerveza (Olaniran et al., 2017). Paralelamente, la degradación de aminoácidos como valina y leucina origina aldehídos de Strecker (2-metilpropanal y 3-metilbutanal) asociados a notas dulces, a malta o pan, especiales en estilo de perfil maltoso (Ferreira, 2021).

La formación y estabilidad de compuestos aromáticos durante la cocción del mosto están condicionadas por factores como la intensidad y duración del hervor, el pH, la concentración de azúcares y la disponibilidad de compuestos nitrogenados. También resulta determinante la eficiencia en la conversión térmica del lúpulo y la proporción de isómeros cis/trans, que influyen en la calidad sensorial y en la evolución del amargor durante el almacenamiento (Klimczak y Cioch-Skoneczny, 2023). En este contexto, Lin et al. (2022) demostraron que la aplicación de endo- y exo-proteasas en la maceración libera aminoácidos como leucina, isoleucina, valina y fenilalanina, favoreciendo la síntesis de alcoholes superiores (3-metilbutanol) y ésteres (3-metilbutil acetato) a través de la vía de Ehrlich. Esta mayor disponibilidad de precursores nitrogenados incrementó en un 17 % la concentración de dichos compuestos en fermentaciones con *S. pastorianus*, confirmando su papel en la configuración del perfil aromático, especialmente en cervezas tipo lager (Lin et al., 2022).

3.4 Fermentación

La fermentación es responsable de gran parte del perfil aromático de la cerveza, especialmente mediante la producción de ésteres como acetato de isoamilo o acetato de etilo. En cervezas sin alcohol, donde se aplican fermentaciones restringidas o paradas fermentativas, estos compuestos suelen encontrarse en menor concentración. Según Rettberg et al. (2022), la baja producción de ésteres y alcoholes superiores en cervezas sin alcohol puede generar perfiles sensoriales planos, especialmente por la reducción de compuestos como el acetato de isoamilo y el 2-feniletanol. No obstante, el empleo de cepas de *S. cerevisiae* con alta actividad de alcohol acetiltransferasas y de levaduras no convencionales como *Torulaspora delbrueckii* o *Hanseniaspora vineae* permite mejorar la síntesis de metabolitos frutales y florales. A su vez, condiciones de fermentación ajustadas, como temperaturas más altas (18–20 °C), mayor disponibilidad de oxígeno y una adecuada provisión de nitrógeno, favorecen un perfil más complejo y aceptable (Loviso y Libkind, 2019; Rettberg et al., 2022).

Alves et al. (2021) analizaron la evolución de 60 compuestos volátiles a lo largo de seis etapas del proceso cervecero en cervezas tipo lager y observaron que durante la

fermentación se acumulan la mayoría de ellos, en especial ésteres y alcoholes superiores como el acetato de isoamilo, hexanoato de etilo y 2-feniletanol. Su concentración aumenta con temperaturas moderadas y una adecuada disponibilidad de precursores nitrogenados. Esta etapa genera más del 70 % de los compuestos volátiles detectables en el producto final, subrayando la influencia de la cepa de levadura y las condiciones de fermentación en la definición del perfil aromático (Alves et al., 2021). En consecuencia, la fermentación, señalada en la (Figura 1) como la etapa de mayor generación de compuestos volátiles, resulta decisiva para definir el aroma final de la cerveza

3.5 Maduración

Durante la maduración, se degradan compuestos indeseados como diacetilo (aroma a mantequilla) y acetaldehído (notas verdes), mejorando la estabilidad aromática. Al mismo tiempo se forman compuestos de bajo umbral olfativo, como éteres furánicos derivados del furfural, que enriquecen el bouquet. La eficiencia depende de la temperatura, la duración y la presencia de levaduras residuales; sin embargo, temperaturas elevadas en el almacenamiento pueden acelerar la aparición de aldehídos de envejecimiento como el 2-nonenal, comprometiendo la frescura de la cerveza (Ferreira, 2021; Morales-Toyo, 2018).

4 Métodos de análisis de la composición aromática en cerveza

La caracterización de los compuestos aromáticos de la cerveza requiere técnicas instrumentales sensibles, seleccionadas según el tipo de compuesto, su relevancia sensorial y el objetivo del análisis, como control de calidad o investigación científica. A continuación, se presentan las principales técnicas para estudiar la fracción volátil de la cerveza.

4.1 Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS)

La cromatografía de gases (GC), especialmente acoplada a espectrometría de masas (MS), es ampliamente utilizada para analizar compuestos volátiles en cerveza, como ésteres, alcoholes superiores, aldehídos, cetonas y compuestos sulfurosos, gracias a su alta resolución y sensibilidad (Bortoleto et al., 2022; Stefanuto et al., 2017), siendo el estándar para estudios de aroma durante la fermentación, la maduración y el almacenamiento.

Esta técnica separa los compuestos volátiles en una columna cromatográfica capilar mediante calentamiento controlado y los identifica por espectrometría de masas, que compara los fragmentos con bibliotecas de referencia. En cervecería, permite cuantificar compuestos individuales (como el acetato de isoamilo o el furfural) y construir un “*fingerprint* aromático” completo. Su alta sensibilidad detecta sustancias en micro o nanogramos por litro, crucial para analizar compuestos con umbrales sensoriales bajos (Riu-Aumatell et al., 2014; Witrick et al., 2020).

4.2 Microextracción en fase sólida (SPME)

La técnica HS-SPME (headspace solid-phase microextraction) se utiliza como preconcentración antes del GC-MS, adsorbiendo compuestos volátiles en una fibra que luego se desorbe térmicamente. Es especialmente útil para alcoholes, ésteres, aldehídos y compuestos azufrados, sin necesidad de disolventes, siendo eficiente y ecológica (Gil et al., 2003; Herkenhoff et al., 2024; Monacci et al., 2024). Esta técnica adsorbe compuestos volátiles del espacio de cabeza mediante una fibra recubierta selectiva, como Polidimetilsiloxano (PDMS) o Divinilbenceno (DVB)/Carboxen, que luego se desorbe térmicamente en la GC-MS, permitiendo estudiar el aroma de la cerveza sin alterar el equilibrio natural entre compuestos volátiles y no volátiles (Cao et al., 2024; Chen et al., 2025).

4.3 Olfatometría acoplada a GC (GC-O) y análisis sensorial

La cromatografía de gases con evaluación olfativa (GC-O) permite identificar compuestos sensorialmente activos, incluso en bajas concentraciones, complementándose con paneles entrenados para valorar su impacto aromático. Esta técnica es clave para identificar defectos (como el trans-2-nonenal) o marcadores positivos (como el 4-vinilguayacol) en cervezas (Piornos et al., 2023). En esta técnica, el efluente del cromatógrafo de gases se divide entre el detector y una salida olfativa, permitiendo identificar moléculas aromáticamente activas y priorizar las que influyen en el aroma percibido por el consumidor (Yorke et al., 2021).

4.4 Métodos espectroscópicos y análisis quimiométrico

Técnicas como la resonancia magnética nuclear (RMN) y la cromatografía líquida acoplada a RMN o espectrometría de masas (LC-NMR, LC-MS) se emplean para caracterizar compuestos aromáticos no volátiles o polares (fenoles o productos de

degradación del lúpulo o malta). Estas herramientas permiten obtener información estructural detallada de manera directa, sin necesidad de procesos previos de purificación complejos. Además, herramientas quimiométricas como el análisis de componentes principales (ACP) o la regresión PLS permiten correlacionar perfiles químicos con atributos sensoriales o tecnológicos, como el estilo de cerveza, frescura o aceptabilidad (Clorio-Carrillo et al., 2025; Mikyška et al., 2023).

Estas técnicas permiten no solo identificar estructuras moleculares complejas, sino también analizar patrones de datos multivariantes. Por ejemplo, el ACP ayuda a diferenciar lotes o etapas del proceso según su huella volátil, mientras que PLS permite asociar compuestos específicos con descriptores sensoriales medidos por paneles o consumidores (Ferreira y Guido, 2023).

4.5. Uso de la Inteligencia Artificial

La caracterización aromática de la cerveza ha incorporado inteligencia artificial (IA), integrando sensores, visión por computadora y aprendizaje automático para predecir perfiles volátiles sin métodos destructivos. En 20 cervezas comerciales, González y Fuentes (2020) desarrollaron modelos de redes neuronales (ANN) que predijeron con precisión compuestos como feniletanol, caproato de etilo, octanoato de etilo y o-tolualdehído. Las cervezas de fermentación espontánea mostraron más ésteres frutales y alcoholes florales, asociados con mayor volumen y retención de espuma. Estos resultados destacan la relevancia de parámetros físico-visuales (distribución de burbujas, drenaje de espuma) en la liberación de compuestos aromáticos (De Flaviis et al., 2022; González et al., 2019).

Gao et al. (2024) demostraron que la espectroscopía Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR), combinada con modelos de aprendizaje automático (AA), permite cuantificar con alta precisión compuestos volátiles clave, ofreciendo una alternativa rápida y no destructiva al GC-MS. En paralelo, Schreurs et al. (2024) integraron datos químicos y sensoriales de 250 cervezas con más de 180 000 reseñas de consumidores, entrenando modelos predictivos capaces de anticipar el perfil sensorial y la aceptación del consumidor. Estos enfoques evidencian el potencial de la analítica avanzada para complementar los métodos clásicos y optimizar el diseño aromático de la cerveza (Gao et al., 2024; Schreurs et al., 2024).

5 Evolución del perfil aromático durante el almacenamiento

5.1 Cambios químicos durante el envejecimiento

Durante el almacenamiento, incluso en condiciones anaerobias, la presencia de iones metálicos como el hierro acelera la formación de compuestos aromáticos no deseados. El Fe^{2+} cataliza la oxidación lipídica, transformando ácidos grasos en aldehídos como el trans-2-nonenal, responsable de notas a cartón húmedo. Concentraciones tan bajas como 30 ppb pueden activar rutas prooxidantes que degradan rápidamente el perfil fresco, siendo especialmente críticas en cervezas pálidas y de baja turbidez (Van Mieghem et al., 2023).

La degradación de los ésteres frutales como acetato de isoamilo y acetato de feniletilo disminuye su impacto sensorial y la complejidad aromática de la cerveza, mientras que la concentración de ácidos carboxílicos como ácido hexanoico y octanoico puede aumentar, generando notas agrias o jabonosas (Monacci et al., 2024; Yang et al., 2021).

El envejecimiento también afecta a compuestos sulfurosos; tioles volátiles como 3-mercaptohexanol y 4-mercapto-4-methylpentan-2-one que pueden oxidarse, disminuyendo su intensidad aromática y afectando a la frescura de estilos como las IPA (Aguiar et al., 2022a; Tokpohozin et al., 2019). Además, se acumula trans-2-nonenal, asociado al aroma a cartón, formado por la oxidación de lípidos insaturados durante almacenamiento a temperaturas superiores a 20 °C (Kishimoto et al., 2018).

Rendall et al. (2015) aplicaron un análisis quimiométrico, incluyendo ACP y análisis de conglomerados, para identificar el inicio de alteraciones químicas en la cerveza durante el almacenamiento, detectando que tras seis meses comienza una desviación significativa del perfil aromático, con aceleración del deterioro a partir del séptimo mes (Rendall et al., 2015).

En conjunto, los cambios químicos durante el almacenamiento reflejan una dinámica compleja entre degradación, oxidación y transformación de compuestos volátiles. Comprender estos procesos permite optimizar la estabilidad aromática mediante el diseño de estrategias tecnológicas adecuadas.

5.2 Influencia del tipo de envase: botella vs lata

El tipo de envase influye significativamente en la evolución aromática de la cerveza durante su almacenamiento. Botellas de vidrio y latas de aluminio difieren en la cinética

de oxidación y en la retención de compuestos volátiles clave (de Lima et al., 2023). Las latas, si están bien selladas, ofrecen una barrera total a luz y oxígeno, favoreciendo la estabilidad, aunque el material puede interactuar con ciertos compuestos. De ese modo, se ha reportado menor percepción de ésteres frutales en cervezas enlatadas frente a embotelladas, posiblemente por retención o sorción en el revestimiento interno (Ivusik et al., 2006; Monacci et al., 2024).

En cervezas tipo lager, la frescura aromática en botellas comienza a disminuir a partir del cuarto mes. Esto se debe al aumento de aldehídos como el trans-2-nonenal, influenciado también por el tipo de cierre. Las latas ofrecen mayor estabilidad frente a la luz y al oxígeno. Sin embargo, pueden alterarse por temperaturas elevadas o por defectos en el recubrimiento interno, afectando al perfil sensorial (Díaz et al., 2022; Humia et al., 2019).

5.3 Factores que aceleran la pérdida de frescura

La degradación aromática durante el almacenamiento se debe principalmente al oxígeno presente en la cerveza, ya sea disuelto en el líquido o retenido en el espacio de cabeza del envase. Aunque este volumen de gas puede purgarse con CO₂, nitrógeno o dejarse al vacío, a menudo contiene aire (aprox. 21 % de oxígeno), que puede difundir hacia la cerveza si no se controla adecuadamente. Incluso niveles bajos (<0,05 mg/L) inducen la oxidación de alcoholes y lípidos, generando aldehídos como trans-2-nonenal o hexanal, responsables de notas rancias (Olaniran et al., 2017; Olmo et al., 2014). El ingreso de oxígeno se produce durante el llenado, por el aire residual en el espacio de cabeza, por microfugas en los cierres o por la permeabilidad del envase.

La temperatura de almacenamiento es un factor crítico, ya que el calor acelera reacciones de oxidación, hidrólisis y Maillard, además de favorecer la pérdida de compuestos volátiles inestables, como ésteres frutales y tioles, cuya degradación reduce notablemente la frescura en menos de tres meses a más de 20 °C (Monacci et al., 2024; Olmo et al., 2014). La luz también degrada el aroma, sobre todo en botellas de vidrio claro o verde al inducir la fotodegradación de isohumulonas en presencia de riboflavina, formando compuestos azufrados volátiles como el 3-metil-2-buten-1-ol (MBT), responsable del conocido aroma "*lightstruck*" o "gusto a luz" (Kishimoto et al., 2018., Pirrone et al., 2022).

Recientes investigaciones han evidenciado que la espuma de la cerveza no solo cumple funciones estéticas y protectoras, sino que también favorece la liberación de

compuestos aromáticos. Mediante espectrometría de masas por tiempo de vuelo con reacción de transferencia protónica (PTR-TOF/MS, por sus siglas en inglés), se observó que, tras el espumado, compuestos como hexanoato de etilo, octanoato de etilo, isoamilo acetato y decanoato de etilo aumentaron en fase gaseosa entre 2.5 y 9 veces. Esta volatilización se relacionó con el *log Pow*, mostrando que los compuestos más hidrofóbicos migran con mayor facilidad a la espuma y se liberan al colapsar las burbujas. Dicha propiedad, asociada a los ésteres afrutados, puede aprovecharse en el diseño de cervezas con perfiles sensoriales más intensos mediante la manipulación del perfil espumante (Kaneda et al., 2024; Yang et al., 2021).

Por ello, para preservar la estabilidad aromática de la cerveza, se recomienda un control riguroso de oxígeno, temperaturas de almacenamiento por debajo de 10 °C, envases opacos o con tratamiento anti-UV, y minimizar el tiempo entre producción y consumo (Mikyška et al., 2021; Monacci et al., 2024).

Las vibraciones durante el transporte intensifican la oxidación y favorecen la acumulación de compuestos de envejecimiento, responsables de la pérdida de frescura aromática. El tipo de envase modula este efecto, siendo las botellas de PET más susceptibles a variaciones aromáticas, frente a las latas de aluminio y barriles de acero inoxidable que ofrecen mayor estabilidad (Aguar et al., 2022b).

6 Tendencias e innovación en la mejora del perfil aromático de las cervezas

6.1 Nuevas variedades de lúpulo y maltas especiales

El desarrollo de nuevas variedades de lúpulo ha impulsado la diversificación sensorial de las cervezas artesanales. Variedades como Cascade y Comet han mostrado adaptabilidad a regiones como Brasil, favoreciendo estilos con identidad regional y aromas distintivos. Bajo condiciones específicas de luz e irrigación, se maximiza la producción de terpenoides, responsables de aromas cítricos, florales y resinosos (Díaz et al., 2022; Silva et al., 2019).

El uso de maltas especiales, como tostadas o caramelizadas, modifica el perfil aromático a través de compuestos propios de la reacción de Maillard, entre ellos pirazinas, furfurales y maltol, este último con aroma a caramelo típico de maltas muy tostadas. Estos aportan notas a nuez, pan horneado, caramelo y tostado. El nivel de tostado y la

temperatura de horneado determinan su generación, lo que permite modificar perfiles aromáticos complejos y deseables (Prado et al., 2021).

La combinación de nuevas variedades de malta base (como Maris Otter y Pilsner) con técnicas de secado específicas también permite variar el contenido de polifenoles y antioxidantes en el mosto. Estos compuestos no solo contribuyen al aroma mediante interacciones con otros compuestos volátiles, sino que también mejoran la estabilidad sensorial del producto final. Se ha evidenciado que las maltas con mayor retención de polifenoles tienen un impacto positivo en la percepción de cuerpo y persistencia aromática (Monacci et al., 2024).

La incorporación de aromas de lúpulo es una estrategia eficaz para ajustar el perfil sensorial y emocional de la cerveza sin alterar su aceptación. Silva et al. (2019) evidenciaron que distintas concentraciones de aroma de lúpulo (Mount Hood) modificaron la percepción de atributos “floral”, “herbal” y “afrutado” durante la degustación. Aunque todas las muestras fueron bien aceptadas, la de mayor concentración generó respuestas emocionales más positivas, como “feliz”, “satisfecho” y “relajado”. Este análisis, denominado perfil emocional del consumidor, estudia las respuestas afectivas durante el consumo y confirma el potencial del diseño aromático para influir en la experiencia subjetiva (McCabe et al., 2023).

6.2 Uso de levaduras no convencionales

El interés por las levaduras no convencionales ha crecido significativamente en la industria cervecera, especialmente en el segmento artesanal, donde se busca una mayor complejidad aromática. Estas levaduras, distintas a *S. cerevisiae* y *S. pastorianus*, han demostrado una capacidad destacada para producir compuestos volátiles como alcoholes superiores, ésteres, ácidos y fenoles, contribuyendo a un bouquet sensorial más amplio, con notas frutales, florales y especiadas (Loviso y Libkind, 2019).

Géneros como *Brettanomyces*, *Pichia* o *Torulaspora* amplían el perfil sensorial al producir ésteres menos comunes en cervezas convencionales, como el lactato de etilo, decanoato de etilo o feniletanoato de etilo, que aportan notas tropicales, lácticas o florales distintivas. No obstante, también pueden generar compuestos indeseables como el diacetilo (Pina et al., 2022). Entre las especies no convencionales, *S. jurei*, aislada de corteza de roble, ha mostrado potencial para generar nuevos perfiles aromáticos mediante hibridación con *S. cerevisiae*. En un estudio reciente se generaron

seis híbridos, de los cuales dos destacaron por su tolerancia al frío, buena atenuación y elevada producción de ésteres con aromas frutales y terpenos con notas florales, generando perfiles sensoriales complejos sin hiperatenuación ni exceso de fenoles (Giannakou et al., 2021; Jabłoński et al., 2024).

Asimismo, la cepa nativa *Hanseniaspora vineae* se ha utilizado con éxito en fermentaciones mixtas para aumentar la intensidad frutal en cervezas tipo “Blond” y de trigo. Estudios han demostrado que dicha cepa es capaz de producir compuestos como feniletanol y acetato de isoamilo en concentraciones superiores al umbral sensorial, reforzando la personalidad aromática del producto final (Aguar-Cervera et al., 2024; Larroque et al., 2021).

Diversos estudios han demostrado que las cervezas artesanales presentan una mayor complejidad en su perfil aromático en comparación con las industriales. Por ejemplo, Bortoleto et al. (2022) cuantificaron alcohol isoamílico, propanol e isobutanol en 18 cervezas artesanales y 8 industriales, mostrando concentraciones significativamente más elevadas en las artesanales. Esto se asocia con procesos fermentativos caracterizados por un menor grado de estandarización en variables como temperatura, oxigenación o nutrientes, lo que incrementa la síntesis de alcoholes superiores y ésteres y aporta una mayor diversidad aromática.

Francesca et al. (2023) emplearon cepas no convencionales como *Lachancea thermotolerans* MNF105 y *S. cerevisiae* MN113, aisladas de matrices azucaradas (manna), en la fermentación de cerveza con níspero. Estas levaduras generaron mayor complejidad aromática que los controles comerciales, con más alcoholes superiores, ésteres como lactato de etilo y notas frutales equilibradas. La estrategia ofrece una alternativa biotecnológica para producir cervezas ácidas sin bacterias lácticas y diversificar el perfil sensorial.

6.3 Incorporación de adjuntos

Para la elaboración de cerveza se ha utilizado de manera tradicional la cebada malteada como principal fuente de hidratos de carbono fermentables. Sin embargo, en los últimos años, se han incorporado otros adjuntos cerveceros, como cereales, frutas y especias, con el fin de diversificar perfiles sensoriales, responder a demandas de innovación o reducir costos de producción.

La adición de frutas (cerezas, maracuyá, mango o frambuesas) y especias (cilantro, canela, jengibre, cardamomo) incorpora terpenos, alcoholes alifáticos y aldehídos aromáticos que complementan el perfil de malta y lúpulo, intensificando aromas frutales, florales o especiados y aumentando la complejidad sensorial, apreciada en estilos como cervezas ácidas, de trigo afrutadas o cervezas estacionales (González et al., 2019). Ganatsios et al. (2021) demostraron que levaduras inmovilizadas sobre pulpa de naranja incrementaron hasta cinco veces los ésteres y 27 los terpenos frente a levaduras libres, mejorando el perfil aromático y promoviendo una economía circular al valorizar residuos agroindustriales (Ganatsios et al., 2021).

Recientemente, varios trabajos han demostrado que la adición de frutas no solo diversifica el perfil sensorial de la cerveza, sino que también potencia su contenido bioactivo. Głowacki et al. (2025) evaluaron la incorporación de fresas y frambuesas en cervezas ácidas, observando que las fresas incrementaron significativamente los compuestos fenólicos (205–237 mg GAE/L) y la capacidad antioxidante (FRAP: 0,82–1,17 mmol TE/L), mientras que las frambuesas mejoraron atributos sensoriales como color, espuma y frutalidad percibida. De forma complementaria, Cela et al. (2024) analizaron la percepción de 496 consumidores y 54 productores en Italia respecto a cervezas elaboradas con frutas locales y subproductos agroindustriales, encontrando una actitud positiva hacia ambas alternativas. Aunque la cerveza con subproductos se percibió como menos sabrosa, la intención de compra se mantuvo elevada, lo que refleja el interés por la sostenibilidad y el uso de ingredientes de proximidad. En conjunto, estos estudios evidencian que el uso de frutas contribuye tanto a la complejidad aromática y funcional de la cerveza como a reforzar la aceptación del consumidor en un mercado orientado a la innovación sostenible (Cela et al., 2024; Głowacki et al., 2025).

El estudio de Medina et al. (2023) analizó 19 cervezas artesanales uruguayas (Blond Ale e IPA), identificando 37 compuestos volátiles como alcoholes superiores, ésteres, ácidos grasos y fenoles. El análisis multivariante (APC) permitió diferenciar parcialmente ambos estilos, destacando en IPA la presencia de 1-hexanol y 4-vinilguayacol, y en Blond Ale los ácidos hexanoico e isobutírico, lo que evidencia la influencia del proceso y las materias primas en el perfil aromático final. (Medina et al., 2023).

En las últimas décadas, el uso de materias primas no convencionales en la industria cervecera ha crecido por su aporte de compuestos aromáticos únicos y beneficios funcionales. Ingredientes como arroz rojo, quinoa, amaranto, bayas, café o incluso hortalizas fermentadas se incorporan en cervezas artesanales e industriales, aportando

notas afrutadas, terrosas o tostadas, así como contenido antioxidante y fenólico total (Clorio-Carrillo et al., 2025; Radu et al., 2024).

7 Conclusiones

El perfil aromático de la cerveza se configura a partir de la interacción entre materias primas y proceso de elaboración. El lúpulo aporta terpenos y tioles de gran impacto sensorial, la malta genera compuestos de Maillard que confieren notas tostadas y caramelizadas, y la levadura determina en gran medida la concentración de ésteres y alcoholes superiores. Incluso el agua, a través de su composición mineral, condiciona el equilibrio y la expresión de estos compuestos.

La fermentación constituye la fase clave en la formación de más del 70 % de los compuestos volátiles característicos de la cerveza, mientras que la maceración y la cocción regulan la disponibilidad de precursores. La maduración corrige defectos como el diacetilo y estabiliza el bouquet, aunque la frescura puede perderse durante el almacenamiento por oxidación y exposición a la luz, con la aparición de compuestos como el trans-2-nonenal.

Las tendencias actuales se orientan hacia la diversificación sensorial mediante nuevas variedades de lúpulo y malta, levaduras no convencionales y el uso de adjuntos como cereales, frutas y especias. Estas prácticas amplían la complejidad aromática y fortalecen la diferenciación en un mercado en el que el aroma se consolida como uno de los principales atributos de calidad.

Este análisis bibliográfico aporta una base sólida para futuras investigaciones orientadas hacia la elaboración de cervezas con perfiles aromáticos diferenciados y la mejora de la estabilidad sensorial del producto final.

8 Bibliografía

Aguiar, D. & Pereira, A. & Marqués, J. (2022a). Assessment of Staling Aldehydes in Lager Beer under Maritime Transport and Storage Conditions. *Molecules*, 27(2), 600-615. <https://doi.org/10.3390/molecules27030600>

Aguiar, D., Pereira, A. C. & Marques, J. C. (2022b). The influence of transport and storage conditions on beer stability—A systematic review. *Food and Bioprocess Technology*, 15(6), 1477–1494. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02790-8>

Aguiar-Cervera, J., Visinoni, F., Zhang, P., Hollywood, K., Vrhovsek, U., Severn, O. & Delneri, D. (2024). Effect of *Hanseniaspora vineae* and *Saccharomyces cerevisiae* co-

- fermentations on aroma compound production in beer. *Food Microbiology*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2024.104585>
- Alves, V., Gonçalves, J., Figueira, J. A., Ornelas, L. P., Branco, R. N., Câmara, J. S. & Pereira, J. A. (2020). Beer volatile fingerprinting at different brewing steps. *Food Chemistry*, 326. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126856>
- BOE. (2016). *Real Decreto 678/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba la norma de calidad de la cerveza*. Boletín Oficial del Estado, núm. 307, 21 de diciembre de 2016, páginas 89333 a 89341. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2016/12/16/678>
- Bortoleto, G. G. & Gomes, W. P. (2022). Monitoring of Organic Volatile Compounds in Craft Beers During Fermentative Process. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 11(4). <https://doi.org/10.55251/jmbfs.4761>
- Bortoleto, G. G., Gomes, W. P., Ushimura, L. C., Bonança, R. A. & Novello, E. H. (2022). Evaluation of the profile of volatile organic compounds in industrial and craft beers. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 12(2). <https://doi.org/10.55251/jmbfs.5532>
- Cao, K., Wu, J., Wan, X., Hou, Y., Zhang, C., Wang, Y., Zhang, L., Yang, W., He, Y. & Wu, R. (2024). Impact of non-Saccharomyces yeasts derived from traditional fermented foods on beer aroma: Analysis based on HS-SPME-GC/MS combined with chemometrics. *Food Research International*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114366>
- Cela, N., Fontefrancesco, M. F. & Torri, L. (2024). Fruitful brewing: Exploring consumers' and producers' attitudes towards beer produced with local fruit and agroindustrial by-products. *Foods*, 13(17), 2674. <https://doi.org/10.3390/foods13172674>
- Chen, B., Luo, N., Tu, J. & Chen, M. (2025). Study on the Analysis of Malt Aroma Compounds and Their Correlation with Sensory Characteristics Evaluation Based on HS-SPME-GC-MS Coupled Technique. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 83(2), 154-164. <https://doi.org/10.1080/03610470.2025.2449756>
- Clorio-Carrillo, J. A., Pérez-Carrillo, E., Villarreal-Lara, R., González Viejo, C., Heredia-Olea, E., De Anda-Lobo, I. C. & Hernández-Brenes, C. (2025). Chemometric mapping of beer styles: Integration of hordenine into the beer. *Food Chemistry*, 478. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143643>
- Correia, A. C., González-SanJosé, M. L., Ortega-Heras, M. & Jordão, A. M. (2023). Preliminary Study of the Effect of Short Maceration with Cherry and Oak Wood Chips on the Volatile Composition of Different Craft Beers. *Beverages*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/beverages9030079>
- De Flaviis, R., Santarelli, V., Mutarutwa, D., Giuliani, M. & Sacchetti, G. (2022). Volatiles profile of 'Blanche' wheat craft beer as affected by wheat origin: A chemometric study. *Food Chemistry*, 385. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132696>
- De Lima, A. C., Aceña, L., Mestres, M. & Boqué, R. (2023). Monitoring the Evolution of the Aroma Profile of Lager Beer in Aluminium Cans and Glass Bottles during the Natural Ageing Process by Means of HS-SPME/GC-MS and Multivariate Analysis. *Molecules*, 28(6), 2807. <https://doi.org/10.3390/molecules28062807>
- Díaz, A. B., Durán-Guerrero, E., Lasanta, C. & Castro, R. (2022). From the Raw Materials to the Bottled Product: Influence of the Entire Production Process on the Organoleptic Profile of Industrial Beers. En *Foods* (Vol. 11, Número 20). MDPI. <https://doi.org/10.3390/foods11203215>

- Doorn, G., Van Ferguson, R., Watson, S., Timora, J., Berends, D. & Moore, C. (2021). A preliminary investigation of the effect of ethical labeling and moral self-image on the expected and perceived flavor and aroma of beer. *Beverages*, 7(2), 42. <https://doi.org/10.3390/beverages7020042>
- Ferreira, I. M. & Guido, L. F. (2023). Advances in Extraction Techniques for Beer Flavor Compounds. *Beverages*, 9(3), 71. <https://doi.org/10.3390/beverages9030071>
- Ferreira, M. (2021). *Chemical changes and off-flavours development in beer during storage*. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/139306/2/527120.pdf>
- Francesca, N., Pirrone, A., Gugino, I., Prestianni, R., Naselli, V., Settanni, L., Todaro, A., Guzzon, R., Maggio, A., Porrello, A., Bruno, M., Farina, V., Passafiume, R., Alfonzo, A., Moschetti, G. & Gaglio, R. (2023). A novel microbiological approach to impact the aromatic composition of sour loquat beer. *Food Bioscience*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103011>
- Fritsch, H. T. & Schieberle, P. (2005). Identification based on quantitative measurements and aroma recombination of the character impact odorants in a Bavarian Pilsner-type beer. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(19), 7544–7551. <https://doi.org/10.1021/jf051167k>
- Ganatsios, V., Terpou, A., Bekatorou, A., Plessas, S. & Koutinas, A. A. (2021). Refining Citrus Wastes: From Discarded Oranges to Efficient Brewing Biocatalyst, Aromatic Beer, and Alternative Yeast Extract Production. *Beverages*, 7(2), 16. <https://doi.org/10.3390/beverages7020016>
- Giannakou, K., Visinoni, F., Zhang, P., Nathoo, N., Jones, P., Cotterrell, M., . . . Delneri, D. (2021). Biotechnological exploitation of *Saccharomyces jurei* and its hybrids in craft beer fermentation uncovers new aroma combinations. *Food Microbiology*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103838>
- Gao, Y.-F., Li, X.-Y., Wang, Q.-L., Li, Z.-H., Chi, S.-X., Dong, Y., Guo, L. & Zhang, Y.-H. (2024). Discrimination and quantification of volatile compounds in beer by FTIR combined with machine learning approaches. *Food Chemistry: X*, 22, 101300. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101300>
- Gil, A. M., Duarte, I. F., Godejohann, M., Braumann, U., Maraschin, M. & Spraul, M. (2003). Characterization of the aromatic composition of some liquid foods by nuclear magnetic resonance spectrometry and liquid chromatography with nuclear magnetic resonance and mass spectrometric detection. *Analytica Chimica Acta*, 488(1), 35-51. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(03\)00579-8](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(03)00579-8)
- Głowacki, A., Paszkot, J., Pietrzak, W. & Kawa-Rygielska, J. (2025). Sour fruit beers—Ethanol and lactic acid fermentation in beer production. *Molecules*, 30(16), 3358. <https://doi.org/10.3390/molecules30163358>
- González, C. & Fuentes, S. (2020). Beer aroma and quality traits assessment using artificial intelligence. *Fermentation*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/FERMENTATION6020056>
- González, C., Fuentes, S., Torrico, D. D., Godbole, A. & Dunshea, F. R. (2019). Chemical characterization of aromas in beer and their effect on consumers liking. *Food Chemistry*, 293, 479-485. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.114>
- Gribkova, I. N., Eliseev, M. N., Belkin, Y. D., Zakharov, M. A. & Kosareva, O. A. (2022). The Influence of Biomolecule Composition on Colloidal Beer Structure. *Biomolecules*, 12(1), 24. <https://doi.org/10.3390/biom12010024>

- Herkenhoff, M., Brödel, O. & Frohme, M. (2024). Aroma component analysis by HS-SPME/GC–MS to characterize Lager, Ale, and sour beer styles. *Food Research International*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114763>
- Humia, B. V., Santos, K. S., Barbosa, A. M., Sawata, M., Mendonça, M. d. & Padilha, F. F. (2019). Beer molecules and its sensory and biological properties: A review. *Molecules*, 24(8). <https://doi.org/10.3390/molecules24081568>
- Ivusik, F., Soldo Gjeldum, M., Nemet, Z., Gracin, L. & Mari, V. (2006). Aluminium and Aroma Compound Concentration in Beer During Storage at Different Temperatures. *Food Technology and Biotechnology*, 44(4), 499–505.
- Jabłoński, S. J., Mielko-Nizialek, K. A., Leszczyński, P., Gasiński, A., Kawa-Rygielska, J., Młynarz, P. & Łukaszewicz, M. (2024). Examination of internal metabolome and VOCs profile of brewery yeast and their mutants producing beer with improved aroma. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64899-4>
- Jelley, R. E., Jones-Moore, H., Guan, A., Ren, C. Z., Chen, J. L., Tonidandel, L., Larcher, R. & Fedrizzi, B. (2022). Simultaneous extraction, derivatisation and analysis of varietal thiols and their non-volatile precursors from beer. *LWT*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113563>
- Kandylis, P., Dimitrellou, D., Gousi, M., Kordouli, E. & Kanellaki, M. (2021). Effect of immobilization support and fermentation temperature on beer and fermented milk aroma profiles. *Beverages*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/beverages7030047>
- Kaneda, H., Aikawa, T., Matsushita, K., Noba, S. & Kobayashi, M. (2024). Beer Foam is a Carrier of Aroma. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 82(2), 160-169. <https://doi.org/10.1080/03610470.2023.2215686>
- Kishimoto, T., Noba, S., Yako, N., Kobayashi, M. & Watanabe, T. (2018). Simulation of Pilsner-type beer aroma using 76 odor-active compounds. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 126(3), 330-338. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2018.03.015>
- Klimczak, K. & Cioch-Skoneczny, M. (2023). Changes in beer bitterness level during the beer production process. *European Food Research and Technology*, 249(1), 13-22. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04154-0>
- Kobayashi, M., Shimizu, H. & Shioya, S. (2008). Beer volatile compounds and their application to low-malt beer fermentation. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 106(4), 317-323. <https://doi.org/10.1263/jbb.106.317>
- Kołota, A., Lachowicz, K. & Stachoń, M. (2020). Characteristic of phenolic compounds of beer and the influence of production process on antioxidant properties. *Technological Progress in Food Processing*, 128-138.
- Kumar, A., Warburton, A., Silcock, P., Bremer, P. J. & Eyres, G. T. (2023). Yeast Strain Influences the Hop-Derived Sensory Properties and Volatile Composition of Beer. *Foods*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/foods12051064>
- Larroque, M. N., Carrau, F., Fariña, L., Boido, E., Dellacassa, E. & Medina, K. (2021). Effect of *Saccharomyces* and non-*Saccharomyces* native yeasts on beer aroma compounds. *International Journal of Food Microbiology*, 337, <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro>
- Lin, C. L., Petersen, M. A., Mauch, A. & Gottlieb, A. (2022). Towards lager beer aroma improvement via selective amino acid release by proteases during mashing. *Journal of the Institute of Brewing*, 128(1), 15-21. <https://doi.org/10.1002/jib.682>

- Loviso, C. L. & Libkind, D. (2019). Synthesis and regulation of flavor compounds derived from brewing yeast: fusel alcohols. *Revista Argentina de Microbiología*, 51(4), 386-397. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2018.08.006>
- McCabe, A. K., Keyes, J. K., Hemetsberger, H., Kurr, C. V., Albright, B., Ward, M. G., McKinley, M. L., Breezley, S. J. & Cole, C. A. (2023). Aroma Profile Development in Beer Fermented with Azacca, Idaho-7, and Sultana Hops. *Molecules*, 28(15). <https://doi.org/10.3390/molecules28155802>
- Medina, K., Giannone, N., Dellacassa, E., Schinca, C., Carrau, F. & Boido, E. (2023). Commercial craft beers produced in Uruguay: Volatile profile and physicochemical composition. *Food Research International*, 164, 112349. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112349>
- Mikyška, A., Slabý, M., Dušek, M., Přikryl, J., Nesvadba, V. & Charvátová, J. (2024a). Chemical and sensory profile of lager beers hopped with new Czech bitter varieties Boomerang and Gaia. *KVASNY PRUMYSL*, 70(5), 943-952. <https://doi.org/10.18832/kp2024.70.943>
- Mikyška, A., Slabý, M., Štěrbá, K. & Vrzal, T. (2024b). Static or dynamic dry-hopping of beer: a comparison of analytical and sensory beer profiles. *European Food Research and Technology*, 250(1), 213-224. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04379-7>
- Mikyška, A., Štěrbá, K. & Horák, T. (2023). How maturation time affects the chemical and sensory profile of pale lager beer. *KVASNY PRUMYSL*, 69, 755-764. <https://doi.org/10.18832/kp2023.69.755>
- Mikyška, A., Štěrbá, K., Slabý, M., Nesvadba, V. & Charvátová, J. (2021). Brewing tests of new fine aroma hop varieties (*Humulus lupulus* L.) Saaz Brilliant, Saaz Comfort and Saaz Shine. *KVASNY PRUMYSL*, 67, 464-473. <https://doi.org/https://doi.org/10.18832/kp>
- Monacci, E., Baris, F., Bianchi, A., Vezzulli, F., Pettinelli, S., Lambri, M., Mencarelli, F., Chinnici, F. & Sanmartin, C. (2024). Influence of the drying process of Cascade hop and the dry-hopping technique on the chemical, aromatic and sensory quality of the beer. *Food Chemistry*, 460. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140594>
- Morales-Toyo, M. (2018). Reacciones químicas en la cerveza. *Revista de Química PUCP*, 32(1), 4-11.
- Mosher, M. & Trantham, K. (2017). *Brewing Science: A Multidisciplinary Approach*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46394-0>
- Okechukwu, Q. N., Adadi, P. & Kovaleva, E. G. (2024). Supplementation of *Chlorella vulgaris* Extracts During Brewing: The Effects on Fermentation Properties, Phytochemical Activity and the Abundance of Volatile Organic Compounds. *Beverages*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/beverages10040104>
- Oladokun, O., James, S., Cowley, T., Dehrmann, F., Smart, K., Hort, J. & Cook, D. (2017). Perceived bitterness character of beer in relation to hop variety and the impact of hop aroma. *Food Chemistry*, 230, 215-224. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.03>
- Olaniran, A. O., Hiralal, L., Mokoena, M. P. & Pillay, B. (2017). Flavour-active volatile compounds in beer: production, regulation and control. *Journal of the Institute of Brewing*, 123(1), 13-23. <https://doi.org/10.1002/jib.389>

- Olmo, Á. Del, Blanco, C. A., Palacio, L., Prádanos, P. & Hernández, A. (2014). Pervaporation methodology for improving alcohol-free beer quality through aroma recovery. *Journal of Food Engineering*, 133, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.02.014>
- Olšovská, J., Straková, L., Nesvadba, V., Vrzal, T., Malečková, M., Patzak, J. & Donner, P. (2024). Fine Aroma Hop Pedigree: A Review of Current Knowledge. *Beverages*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/beverages10030090>
- Paszko, J., Gasiński, A. & Kawa-Rygielska, J. (2023). Evaluation of volatile compound profiles and sensory properties of dark and pale beers fermented by different strains of brewing yeast. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-332>
- Pina, R. L., Cruz, D. C. & Martelli, M. C. (2022). Avaliação da influência de aromas gerados por leveduras não convencionais utilizadas na produção de cerveja: uma revisão. *Research, Society and Development*, 11(17), e43111738868. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i17.38868>
- Piornos, J. A., Delgado, A., de La Burgade, R. C., Methven, L., Balagiannis, D. P., Koussissi, E., Brouwer, E. & Parker, J. K. (2019). Orthonasal and retronasal detection thresholds of 26 aroma compounds in a model alcohol-free beer: Effect of threshold calculation method. *Food Research International*, 123, 317-326. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.034>
- Piornos, J. A., Koussissi, E., Balagiannis, D. P., Brouwer, E. & Parker, J. K. (2023). Alcohol-free and low-alcohol beers: Aroma chemistry and sensory characteristics. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(1), 233-259. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13068>
- 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 the brewing yeast. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(5), 1937-1949. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5470-0>
- Pirrone, A., Prestianni, R., Naselli, V., Todaro, A., Farina, V., Tinebra, I., Raffaele, G., Badalamenti, N., Maggio, A., Gaglio, R., Settanni, L., Bruno, M., Moschetti, G., Alfonzo, A. & Francesca, N. (2022). Influence of indigenous *Hanseniaspora uvarum* and *Saccharomyces cerevisiae* from sugar-rich substrates on the aromatic composition of loquat beer. *International Journal of Food Microbiology*, 379, <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109868>
- Postigo, V., Mauro, L., Diaz, T., Saiz, R., Arroyo, T. & García, M. (2024). Autochthonous Ingredients for Craft Beer Production. *Fermentation*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/fermentation10050225>
- Prado, R., Gastl, M. & Becker, T. (2021). Aroma and color development during the production of specialty malts: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(5), 4816-4840. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12806>
- Prado, R., Gastl, M. & Becker, T. (2023). Influence of kilned specialty malt odorant markers on the aroma composition and sensory profile of beer. *LWT*, 173, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114195>
- Protsenko, L., Ryzhuk, S., Liashenko, M., Shevchenko, O., Litvynchuk, S., Yanse, L. & Milosta, H. (2020). Influence of alpha acids hop homologues of bitter and aromatic varieties on beer quality. *Food Technology Ukrainian Food Journal*, 9. <https://doi.org/10.24263/2304>

- Radu, E., Emilia Coldea, T. & Mudura, E. (2024). Unconventional raw materials used in beer and beer-like beverages production: Impact on metabolomics and sensory profile. *Food Research International*, 183, 114203. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114203>
- Reglitz, K., Féchir, M., Mall, V., Voigt, J. & Steinhaus, M. (2022). The impact of caramel and roasted wheat malts on aroma compounds in top-fermented wheat beer. *Journal of the Institute of Brewing*, 128(4), 138-149. <https://doi.org/10.1002/jib.701>
- Rendall, R., Reis, M. S., Pereira, A. C., Pestana, C., Pereira, V. & Marques, J. C. (2015). Chemometric analysis of the volatile fraction evolution of Portuguese beer under shelf storage conditions. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 142, 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2015.01.015>
- Rettberg, N., Lafontaine, S., Schubert, C., Dennenlöhner, J., Knoke, L., Diniz Fischer, P., Fuchs, J. & Thörner, S. (2022). Effect of Production Technique on Pilsner-Style Non-Alcoholic Beer (NAB) Chemistry and Flavor. *Beverages*, 8(1), 4. <https://doi.org/10.3390/beverages8010004>
- Riu-Aumatell, M., Miró, P., Serra-Cayuela, A., Buxaderas, S. & López-Tamames, E. (2014). Assessment of the aroma profiles of low-alcohol beers using HS-SPME-GC-MS. *Food Research International*, 57, 196-202. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.016>
- Schreurs, M., Piampongsant, S., Roncoroni, M., Cool, L., Herrera-Malaver, B., Vanderaa, C., Theßeling, F. A., Kreft, Ł., Botzki, A., Malcorps, P., Daenen, L., Wenseleers, T. & Verstrepen, K. J. (2024). Predicting and improving complex beer flavor through machine learning. *Nature Communications*, 15, 2368. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46346-0>
- Santana, A. F., Fernandes, A. L., Miranda, E., Coronado, L. O., Tibery, L. R. & Finzer, J. R. (2024). HOPS: The Aromatic Ingredient of Breweries. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(9), e08463. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n9-200>
- Silva, A. P., Voss, H. P., van Zyl, H., Hogg, T., de Graaf, C., Pintado, M. & Jager, G. (2019). Effect of adding hop aroma in beer analysed by temporal dominance of sensations and emotions coupled with temporal liking. *Food Quality and Preference*, 75, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2019.02.001>
- Stefanuto, P. H., Perrault, K. A., Dubois, L. M., L'Homme, B., Allen, C., Loughnane, C., Ochai, N. & Focant, J. F. (2017). Advanced method optimization for volatile aroma profiling of beer using two-dimensional gas chromatography time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1507, 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2017.05.064>
- Takoi, K., Koie, K., Itoga, Y., Katayama, Y., Shimase, M., Nakayama, Y. & Watari, J. (2010). Biotransformation of hop-derived monoterpene alcohols by lager yeast and their contribution to the flavor of hopped beer. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(8), 5050–5058. <https://doi.org/10.1021/jf1000524>
- Tocci, N., Riccio, G. M., Ramu Ganesan, A., Hoellrigl, P., Robatscher, P. & Conterno, L. (2023). The Impact of Rye and Barley Malt and Different Strains of *Saccharomyces cerevisiae* on Beer Volatilome. *Beverages*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/beverages9040093>
- Tokpohozin, S. E., Fischer, S. & Becker, T. (2019). Selection of a new *Saccharomyces* yeast to enhance relevant sorghum beer aroma components, higher alcohols and esters. *Food Microbiology*, 83, 181-186. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.05.014>

- Troilo, A., De Francesco, G., Marconi, O., Sileoni, V., Turchetti, B. & Perretti, G. (2019). Low Carbohydrate Beers Produced by a Selected Yeast Strain from an Alternative Source. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 78(1), 80–88. <https://doi.org/10.1080/03610470.2019.1682887>
- Unión Europea. (2025). *Reglamento (UE) no 1169/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo. Legislación.* <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:02011R1169-20250401>
- Van Mieghem, T., Delvaux, F., Dekleermaeker, S. & Britton, S. J. (2022). Top of the Ferrous Wheel – The Influence of Iron Ions on Flavor Deterioration in Beer. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 81(4), 493–503. <https://doi.org/10.1080/03610470.2022.2124363>
- Villacreces, S., Blanco, C. A. & Caballero, I. (2022). Developments and characteristics of craft beer production processes. *Food Bioscience*, 45, 101495. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101495>
- Wang, X., Frank, S. & Steinhaus, M. (2024). Molecular Insights into the Aroma Difference between Beer and Wine: A Meta-Analysis-Based Sensory Study Using Concentration Leveling Tests. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(40), 22250-22257. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c06838>
- Wang, Y., Song, J. & Nie, C. (2024). A review of biotransformation of sulfur compounds in beer brewing. *BIO Web of Conferences*, 111. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202411101018>
- Williams, C., Stander, M. A., Medvedovici, A. & Buica, A. (2023). Volatile terpenoid profiling in gin and beer – A targeted approach. *Journal of Food Composition and Analysis*, 118, 105178. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105178>
- Witrick, K., Pitts, E. R. & O’Keefe, S. F. (2020). Analysis of Lambic Beer Volatiles during Aging Using Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GCMS) and Gas Chromatography–Olfactometry (GCO). *Beverages*, 6(2), 31. <https://doi.org/10.3390/beverages6020031>
- Wu, D., Chen, Z., Lv, Y., Yang, L., Liu, H., Qiu, R., Xu, H., Li, J., Lu, J. & Cai, G. (2024). Coculturing of non-Saccharomyces cerevisiae and Saccharomyces cerevisiae for improving the aroma quality and antioxidant characteristics of beer with Yuan’an yellow tea. *Food Bioscience*, 58, 103725. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103725>
- Yang, M., Zhai, X., Huang, X., Li, Z., Shi, J., Li, Q., Zou, X. & Battino, M. (2021). Rapid discrimination of beer based on quantitative aroma determination using colorimetric sensor array. *Food Chemistry*, 363. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130297>
- Yorke, J., Cook, D. & Ford, R. (2021). Brewing with unmalted cereal adjuncts: Sensory and analytical impacts on beer quality. *Beverages*, 7(1), 1-20. <https://doi.org/10.3390/beverages7010004>
- Zheplinska, M., Mushtruk, M., Vasylyv, V. & Deviatko, O. (2019). Investigation of the process of production of crafted beer with spicy and aromatic raw materials. *Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 13(1), 806-814. <https://doi.org/10.5219/1183>

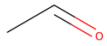
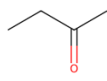
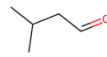
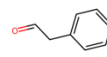
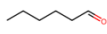
9 Anexo

Anexo 1. Estructura química de los principales compuestos volátiles presentes en la cerveza

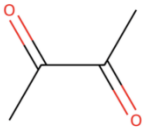
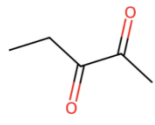
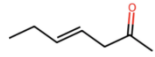
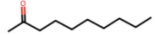
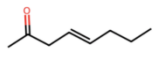
Alcoholes superiores

Propanol	Isobutanol	Alcohol isoamílico	Alcohol amílico	Feniletanol
				
Descripción: Solvente, dulce, alcohol Umbral: 700 mg/L	Descripción: Solvente, alcohol Umbral: 200 mg/L	Descripción: Frutado, banana, alcohol Umbral: 50-65 mg/L	Descripción: Alcohólico, solvente Umbral: 50-70 mg/L	Descripción: Floral, rosas Umbral: 40 mg/L


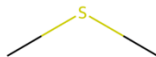
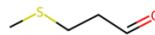

Aldehídos

Acetaldehído	2-Metilbutanal	3-Metilbutanal	Fenilacetaldehído	Hexanal
				
Descripción: Manzana verde, fresco Umbral: 10-25 mg/L	Descripción: Maltoso Umbral: 0.1 mg/L	Descripción: Maltoso Umbral: 0.2 mg/L	Descripción: Floral, miel Umbral: 0.05 mg/L	Descripción: Herbáceo, pasto Umbral: 0.05 mg/L

Cetonas

2,3-Butanediona (diacetilo)	2,3-Pentanediona	3-Hexen-2-one	2-Nonanona	3-Octen-2-one
				
Descripción: Mantequilla, lácteo Umbral: 0.1-0.2 mg/L	Descripción: Mantecoso, cremoso Umbral: 0.02 mg/L	Descripción: Verde, herbáceo Umbral: 0.5 mg/L	Descripción: Dulce, floral Umbral: 1.2 mg/L	Descripción: Graso, afrutado Umbral: 0.4 mg/L

Compuestos azufrados en cerveza

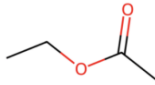
Metional	Sulfuro de dimetilo (DMS)	3-Metiltio-propionaldehído	Metanotiol	Etil mercaptano
				
Descripción: Patata cocida Umbral: 0.01-0.02 mg/L	Descripción: Vegetal, col cocida Umbral: 0.025 mg/L	Descripción: Vegetal, cebolla Umbral: 0.03 mg/L	Descripción: Vegetal, repollo Umbral: 0.0002 mg/L	Descripción: Vegetal, ajo Umbral: 0.001 mg/L

Ácidos orgánicos

Ácido acético	Ácido láctico	Ácido succínico	Ácido isoaléxico	Ácido hexanoico
				
Descripción: Vinagre, agrio Umbral: 175 mg/L	Descripción: Ácido, suave, lácteo Umbral: 400 mg/L	Descripción: Ácido, salado, amargo Umbral: 500 mg/L	Descripción: Queso, pies, rancio Umbral: 0.33 mg/L	Descripción: Graso, rancio, animal Umbral: 4.8 mg/L

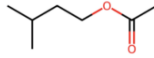
Ésteres

Acetato de etilo



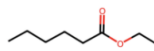
Descripción: Frutado, disolvente
Umbral: 20 mg/L

Acetato de isoamilo



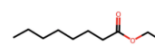
Descripción: Banana, afrutado
Umbral: 1.6 mg/L

Hexanoato de etilo



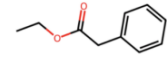
Descripción: Afrutado, manzana
Umbral: 0.2 mg/L

Octanoato de etilo



Descripción: Afrutado, dulce
Umbral: 0.9 mg/L

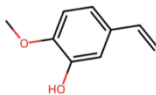
Fenilacetato de etilo



Descripción: Floral, miel
Umbral: 0.25 mg/L

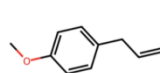
Fenoles

4-vinilguayacol



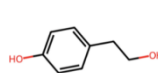
Descripción: Clavo, especiado, fenólico
Umbral: 0.3 mg/L

Eugenol



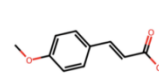
Descripción: Clavo, medicinal
Umbral: 0.01 mg/L

Tirosol



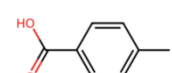
Descripción: Dulce, fenólico, floral
Umbral: 3.0 mg/L

Ácido ferúlico



Descripción: Especiado, tostado
Umbral: 0.5 mg/L

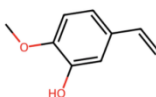
Ácido p-cumárico



Descripción: Herbal, seco, fenólico
Umbral: 0.7 mg/L

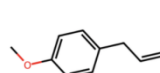
Terpenos

4-vinilguayacol



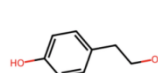
Descripción: Clavo, especiado, fenólico
Umbral: 0.3 mg/L

Eugenol



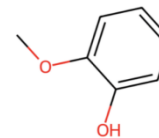
Descripción: Clavo, medicinal
Umbral: 0.01 mg/L

Tirosol



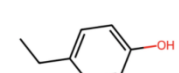
Descripción: Dulce, fenólico, floral
Umbral: 3.0 mg/L

Guayacol



Descripción: Ahumado, fenólico
Umbral: 0.05 mg/L

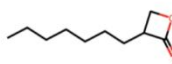
4-etilfenol



Descripción: Medicinal, establo, fenol
Umbral: 0.2 mg/L

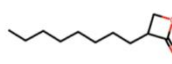
Lactonas

γ -Nonalactona



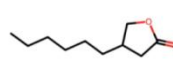
Descripción: Coco, durazno, dulce
Umbral: 0.06 mg/L

γ -Decalactona



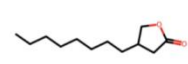
Descripción: Durazno, albaricoque
Umbral: 0.04 mg/L

δ -Octalactona



Descripción: Coco, cremosa
Umbral: 0.03 mg/L

δ -Decalactona



Descripción: Frutal, melocotón
Umbral: 0.05 mg/L

Nota. Adaptado de Alves et al. (2020), Ganatsios et al. (2021), Morales-Toyo (2018) Okechukwu et al. (2024) y Piornos et al. (2023).