

Artículo de síntesis del artículo The physics and chemistry of beer foam: a review (Charles W Bamforth, 2023)

G. Cervezólogo

30/07/2025

Índice

1	Resumen	2
2	Introducción	2
3	Compuestos físicos que mejoran la formación y estabilidad de la espuma	3
3.1	Nucleación	3
3.2	Temperatura.	4
3.3	Carbonatación.	4
3.4	Disproporciónación.	5
3.5	Uso de Nitrógeno (N ₂)	6
3.6	Viscosidad y drenaje	7
3.7	El servicio	8
4	Compuestos químicos que mejoran la formación y estabilidad de la espuma	9
4.1	Proteínas y polipeptidos	9
4.1.1	Proteína Z4	9
4.1.2	Proteína LTP1 (Lipid Transfer Protein 1)	10
4.1.3	Hordeína	11
4.1.4	Complejos proteína-carbohidrato. Glucoproteínas	12
4.2	Ácidos amargos del lúpulo	12
4.3	Iones metálicos	13
4.4	Melanoidinas	14
5	Agentes antiespumantes	15
6	Análisis dinámico de formación y estabilidad de espuma	16
7	Conclusiones	17
8	Bibliografía	18

1 Resumen

El artículo revisa de manera exhaustiva los principios físicos y químicos fundamentales que determinan la formación y la estabilidad de la espuma en la cerveza. Desde una perspectiva física, la producción eficiente de espuma depende críticamente de la existencia de sitios de nucleación adecuados, una temperatura óptima de servicio y un nivel equilibrado de carbonatación. La inestabilidad principal en la espuma ocurre debido al fenómeno conocido como disproporción, donde el dióxido de carbono (CO_2) se mueve desde burbujas más pequeñas hacia burbujas mayores, causando el colapso de las burbujas menores y la consecuente reducción en la estabilidad de la espuma. El uso de nitrógeno en lugar de (CO_2) es una estrategia efectiva para mejorar notablemente la estabilidad, ya que el nitrógeno no experimenta fácilmente esta redistribución entre burbujas.

Desde el punto de vista químico, la estabilidad de la espuma está determinada por el delicado equilibrio entre componentes que favorecen la formación y permanencia de espuma, como polipéptidos específicos, ácidos amargos procedentes del lúpulo, ciertos iones metálicos y melanoidinas; frente a aquellos agentes que tienen efectos negativos sobre la espuma, incluyendo etanol, lípidos y residuos de detergentes. Entre las proteínas estabilizadoras más relevantes presentes en la cebada malteada se encuentran la Proteína Z4 y la Proteína de Transferencia de Lípidos 1. Sin embargo, los fragmentos proteicos derivados de la hordeína, generados durante procesos de malteado o maceración, también intervienen activamente en la espuma; estos fragmentos poseen una elevada capacidad espumante aunque presentan menor capacidad para estabilizar las burbujas en comparación con la Proteína Z4 y la Proteína de Transferencia de Lípidos 1.

Además, se destaca la importancia potencial de los complejos proteína-carbohidrato, especialmente abundantes en cervezas que incorporan trigo en su formulación, como elementos positivos que contribuyen a la mejora de la espuma. Por último, el artículo propone la utilización de modelos cinéticos similares a los aplicados en estudios enzimáticos como herramientas útiles para la interpretación y análisis de la dinámica y estabilidad en sistemas de formación de espuma en cervezas.

Palabras clave: espuma de cerveza; estabilidad de espuma; nucleación; burbujas; disproporción; drenaje; coalescencia; proteínas de la cebada; Proteína Z4; LTP1; hordeína; iso-alfa ácidos; lúpulo; melanoidinas; iones metálicos; calcio; magnesio; factores antiespumantes; etanol; lípidos; detergentes; polifenoles; ácidos grasos libres; contaminaciones microbiológicas; física de la espuma; química coloidal; interfaz gas-líquido; tensioactivos

2 Introducción

La estabilidad de la espuma en la cerveza es un aspecto sensorial de gran importancia tanto para consumidores como para productores. En las últimas décadas, numerosos estudios han abordado los factores fisicoquímicos que influyen en la formación y persistencia de la espuma, incluyendo la interacción entre proteínas, compuestos amargos del lúpulo y condiciones de servicio.

Dada la diversidad de enfoques experimentales y los avances recientes en la caracterización molecular de los componentes espumantes, resulta pertinente realizar una revisión que integre los principales hallazgos y conceptos clave sobre este fenómeno.

El presente artículo tiene como objetivo sintetizar el conocimiento actual sobre los mecanismos físicos y bioquímicos que determinan la estabilidad de la espuma cervecera, con especial énfasis en el papel de proteínas como la LTP1, la influencia de la carbonatación, la temperatura y los tratamientos del mosto. Esta revisión se basa en literatura científica revisada por pares publicada en la European Food Research and Technology.

3 Compuestos físicos que mejoran la formación y estabilidad de la espuma

3.1 Nucleación

La nucleación es un fenómeno físico crucial para la formación de espuma en la cerveza, en el cual las imperfecciones microscópicas, denominadas sitios de nucleación, facilitan la formación inicial de burbujas de gas (principalmente CO_2 o N_2). Estos sitios actúan como puntos de anclaje, disminuyendo la energía necesaria para que el gas disuelto en la cerveza forme burbujas visibles.

Existen diversos tipos de sitios de nucleación:

Físicos: microporos o rugosidades presentes naturalmente en los vasos o copas, como las pequeñas irregularidades en el vidrio de una copa convencional.

Partículas suspendidas: elementos como levadura, proteínas o polvo que permanecen sin disolverse, típicamente presentes en cervezas turbias o artesanales.

Artificiales: grabados láser (“widgets”) en vasos o latas diseñados específicamente para inducir nucleación, muy utilizados en vasos de cerveza como los de Stella Artois o Guinness.

Biológicos: células de levadura remanentes, comunes en cervezas no filtradas como las cervezas de trigo o algunas ales artesanales.

El mecanismo implica que el CO_2 , normalmente en equilibrio dentro del líquido, comienza a acumularse en estos puntos, formando burbujas que eventualmente se desprenden y ascienden, creando espuma. Un ejemplo práctico son los vasos nucleados con grabados láser (generalmente en forma de círculos o estrellas), que aseguran un flujo constante y controlado de burbujas, mejorando la retención y calidad de la espuma, además de ofrecer un efecto visual atractivo.

La ausencia o contaminación de sitios de nucleación puede afectar negativamente la experiencia sensorial: vasos demasiado lisos, como aquellos excesivamente pulidos, o contaminados con grasas y detergentes, reducen significativamente la formación de espuma, haciendo que la cerveza se perciba “plana” incluso si está adecuadamente carbonatada.

3.2 Temperatura.

La temperatura desempeña un papel fundamental en la formación, calidad y persistencia de la espuma en la cerveza, afectando tanto la dinámica de liberación del dióxido de carbono (CO_2) como las propiedades fisicoquímicas del líquido, como la viscosidad. Estos factores interactúan para determinar la estructura, volumen y estabilidad temporal de la espuma generada durante el servicio de la cerveza.

Uno de los factores clave es la solubilidad del CO_2 , directamente influenciada por la temperatura según la ley de Henry, la cual establece que la cantidad de gas disuelto en un líquido disminuye al aumentar la temperatura. A temperaturas bajas, el CO_2 permanece en solución, lo que produce una liberación gradual y controlada al abrir o servir la cerveza. Esta liberación da lugar a la formación de burbujas pequeñas, finas y homogéneas, responsables de una espuma más densa, cremosa y persistente.

Por el contrario, cuando la cerveza se sirve a temperaturas elevadas, la solubilidad del gas se reduce drásticamente, provocando una desgasificación violenta. Esto genera burbujas grandes e irregulares que forman una espuma inicialmente voluminosa, pero con poca estabilidad estructural, lo que conduce a su colapso en pocos segundos.

Además de la solubilidad del gas, la temperatura también afecta la viscosidad del líquido, la cual aumenta levemente en condiciones frías. Esta mayor viscosidad reduce el drenaje del líquido desde las paredes de las burbujas hacia el resto del cuerpo cervecero, retardando el colapso de la espuma. Este fenómeno contribuye a mantener la espuma hidratada y estructuralmente más estable, mejorando tanto su apariencia como su persistencia en boca.

3.3 Carbonatación.

La carbonatación, es el contenido de dióxido de carbono (CO_2) disuelto en la cerveza, ejerce una influencia decisiva en la formación, calidad y persistencia de la espuma. Este gas puede incorporarse de forma natural, mediante la actividad metabólica de la levadura durante la fermentación, o artificialmente durante el proceso de envasado. Según las investigaciones realizadas por Charlie Bamforth, la concentración de CO_2 determina directamente la cantidad, estructura y comportamiento de las burbujas, elementos fundamentales que configuran la espuma.

En niveles bajos de carbonatación, típicos de estilos cerveceros ingleses como Bitter o Mild, la formación de espuma es escasa, con burbujas grandes y frágiles que colapsan rápidamente tras servir la bebida. Esto resulta en una espuma poco persistente que ofrece una experiencia sensorial limitada en términos visuales y táctiles. Por el contrario, en cervezas con niveles medios a altos de carbonatación, como las Lager clásicas, Pale Ales o IPAs, la espuma generada es abundante, homogénea y cremosa, mostrando burbujas finas y una estabilidad prolongada que mejora significativamente la experiencia general del consumidor.

Sin embargo, niveles excesivos de carbonatación pueden conducir a resultados no deseados, especialmente en cervezas altamente carbonatadas como las cervezas de trigo (Weizenbier), Saison o ciertas cervezas belgas refermentadas en botella. En estos casos, aunque inicialmente se obtiene una espuma voluminosa, esta tiende a ser menos estable debido a la rápida liberación

del gas, generando burbujas gruesas y un comportamiento caótico que facilita su colapso prematuro.

Bamforth subraya que la carbonatación no actúa aisladamente, sino que interactúa estrechamente con factores como la temperatura y los sitios específicos de nucleación. En condiciones ideales, una carbonatación equilibrada combinada con una temperatura adecuada favorece la formación controlada de burbujas pequeñas en estos sitios específicos, generando así una espuma consistente y duradera. Por el contrario, una carbonatación excesivamente alta, particularmente cuando la temperatura de servicio es elevada, ocasiona una desgasificación violenta y descontrolada, produciendo una espuma abundante pero frágil, que puede colapsar rápidamente.

Finalmente, la carbonatación tiene también un impacto directo sobre la percepción sensorial global de la cerveza. Niveles equilibrados resaltan la frescura y facilitan una liberación óptima y controlada de aromas y sabores característicos de cada estilo. En cambio, niveles excesivamente elevados pueden generar una sensación molesta de picor o acidez, oscureciendo los matices sensoriales deseados y alterando la percepción del sabor original. Por ello, mantener una carbonatación adecuada y adaptada a cada estilo cervecero es esencial para ofrecer una experiencia sensorial plena y equilibrada, como enfatiza Bamforth en sus investigaciones.

Cuadro 1: Relación entre estilo de cerveza, carbonatación y espuma

Estilo de cerveza	Vol.CO2	Efecto típico en la espuma
Bitter inglesa, Mild, Real Ale	1,0 – 1,8	Mínima, de escasa persistencia
IPA, Pale Ale Americana	2,2 – 2,8	Abundante, estable, con persistencia media-alta
Lager (Pilsner)	2,4 – 2,8	Cremosa, abundante y persistente
Cervezas belgas (Dubbel, Tripel)	2,8 – 3,4	Abundante, aromática, de estabilidad media-alta
Weizenbier, Saison	3,0 – 4,0	Inicialmente abundante, algo menos estable

La carbonatación adecuada es esencial para asegurar una espuma de calidad, duradera y estéticamente agradable, enriqueciendo así la experiencia sensorial del consumidor. Bamforth enfatiza que para lograr la excelencia en la cerveza no basta únicamente con cuidar ingredientes y procesos fermentativos, sino que se requiere un manejo preciso del nivel de carbonatación, adaptado al estilo y a las condiciones de servicio.

3.4 Disproporcionación.

La estabilidad de la espuma en la cerveza es un atributo sensorial esencial que depende de una compleja interacción de factores físicos y químicos. Uno de los principales fenómenos responsables de su degradación es la disproporcionación de burbujas, también conocida como coarsening o maduración de Ostwald. Este proceso físico implica la transferencia de gas desde burbujas pequeñas a burbujas más grandes, lo que provoca el colapso de las primeras y un crecimiento desordenado de las segundas, afectando la homogeneidad y la persistencia de la espuma.

Desde un punto de vista termodinámico, las burbujas más pequeñas presentan una mayor presión interna debido a su curvatura (según la ley de Laplace), lo que hace que el gas contenido en ellas tienda a difundirse hacia burbujas más grandes, con menor presión interna. Este desequilibrio genera una redistribución progresiva del gas, reduciendo el número de burbujas pequeñas y homogéneas que confieren estabilidad y textura cremosa a la espuma. El resultado final es una espuma con burbujas más grandes, frágiles y menos estables, que tiende a colapsar rápidamente.

La velocidad de disproporcionación influye varios factores, entre ellos la composición del líquido interfacial, la presión parcial del gas, la viscosidad y la presencia de agentes estabilizantes. En la cerveza, elementos como las proteínas hidrofóbicas (especialmente la LTP1) y los iso- α -ácidos del lúpulo actúan formando películas alrededor de las burbujas que retardan la difusión del gas y estabilizan la espuma. La viscosidad del líquido, que puede aumentar con temperaturas más bajas o con ciertos ingredientes, también reduce la velocidad de drenaje y de disproporcionación.

Otro elemento clave en la estabilidad de la espuma es la persistencia del lamelar líquido (la delgada película entre burbujas adyacentes). Su evaporación o drenaje prematuro acelera la coalescencia y el colapso estructural de la espuma. Por ello, además del control de la disproporcionación, la retención de humedad entre burbujas y la ralentización del drenaje son fundamentales para prolongar la vida de la espuma.

La disproporcionación es un proceso natural y progresivo que limita la durabilidad de la espuma cervecera. No obstante, su impacto puede ser atenuado mediante un diseño cuidadoso de la receta, la selección de ingredientes espumantes, el control de la carbonatación y la temperatura de servicio. Comprender este fenómeno es esencial para optimizar tanto la estética como la percepción sensorial de la cerveza en el vaso.

3.5 Uso de Nitrógeno (N_2)

El documento elaborado por Bamforth aborda en profundidad la relación existente entre la incorporación de nitrógeno (N_2) en la cerveza y la mejora significativa en la calidad, textura y estabilidad de su espuma. Mientras que tradicionalmente la cerveza se carbonata con dióxido de carbono (CO_2), el uso complementario o alternativo de nitrógeno presenta beneficios notables debido a las diferencias en sus propiedades fisicoquímicas.

La baja solubilidad del nitrógeno en cerveza juega un papel clave en estos efectos positivos. Al ser menos soluble que el CO_2 , el nitrógeno tiende a formar burbujas considerablemente más pequeñas, uniformes y finas. Estas burbujas pequeñas tienen menor tendencia a sufrir procesos de disproporcionación (fenómeno también conocido como maduración de Ostwald), en el cual las burbujas pequeñas colapsan y transfieren gas hacia burbujas más grandes, lo que típicamente causa la desaparición rápida de la espuma.

Al utilizar nitrógeno, la reducción en la disproporcionación genera una espuma más estable y duradera, con una textura densa, cremosa y visualmente atractiva. Esta espuma mejora la percepción sensorial en boca, ofreciendo una sensación más suave y aterciopelada que resalta ciertos estilos de cerveza. Por este motivo, el nitrógeno se utiliza especialmente en

cervezas tipo stout, porter y otras ales nitrogenadas, donde una espuma persistente y cremosa constituye una característica esencial y altamente apreciada por los consumidores.

Bamforth concluye destacando que, aunque el nitrógeno no contribuye significativamente al sabor directo de la cerveza, sí influye notablemente en la percepción global del producto al mejorar su calidad visual y táctil, lo que resulta determinante en la valoración positiva del consumidor.

3.6 Viscosidad y drenaje

El documento de Bamforth explora la importancia de la viscosidad y el drenaje en la estabilidad y calidad de la espuma de la cerveza. Ambos conceptos son cruciales en la dinámica de la espuma, influyendo directamente en su formación, persistencia y percepción sensorial.

La viscosidad es una propiedad física del líquido que describe su resistencia al flujo o movimiento. En la cerveza, una viscosidad relativamente alta contribuye positivamente a la estabilidad de la espuma. Este efecto estabilizador se explica porque un líquido más viscoso limita el movimiento de las moléculas y ralentiza la velocidad a la que las burbujas de gas pueden ascender, fusionarse o romperse. De esta manera, un aumento en la viscosidad conduce a la formación de burbujas más pequeñas, compactas y homogéneas, otorgando mayor persistencia a la espuma formada.

La viscosidad en cerveza está directamente influida por la presencia de sustancias como proteínas, polisacáridos y polipéptidos derivados de la malta, así como beta-glucanos provenientes especialmente de cereales como la cebada o la avena. Estas moléculas, al interactuar y enlazarse entre sí en la película líquida que rodea las burbujas, incrementan la viscosidad local, fortaleciendo las paredes de la espuma y disminuyendo la tendencia de las burbujas a romperse rápidamente.

Por otra parte, el drenaje es el fenómeno que describe la separación gradual del líquido desde la espuma hacia el cuerpo principal de la cerveza debido a la gravedad. Conforme la espuma pierde líquido, las paredes de las burbujas adelgazan y eventualmente se rompen, causando que la espuma colapse. Por tanto, la velocidad del drenaje es un factor decisivo en la duración de la espuma en condiciones de consumo.

El drenaje está determinado en gran medida por factores como la viscosidad del líquido interfacial, la concentración y composición química de compuestos activos en la superficie, el tamaño inicial de las burbujas, y el efecto de tensión superficial del líquido. Una espuma estable y duradera presenta un drenaje más lento, conservando mayor cantidad de líquido atrapado entre burbujas, lo que asegura mayor longevidad y estabilidad visual.

En cervezas con viscosidad baja, el drenaje ocurre rápidamente, provocando la ruptura temprana de las burbujas y generando una espuma escasa o efímera. Por el contrario, en cervezas que poseen una viscosidad mayor, el drenaje se ralentiza considerablemente debido a la mayor resistencia al movimiento de las moléculas líquidas. Esto mantiene la espuma firme, espesa y atractiva por más tiempo.

Bamforth enfatiza claramente la relación crítica y estrecha entre la viscosidad y el drenaje,

destacando estos dos factores como fundamentales para determinar la estabilidad, durabilidad y calidad general de la espuma de la cerveza. La interacción entre ambos fenómenos es dinámica: una mayor viscosidad del líquido ralentiza considerablemente la tasa de drenaje, minimizando la pérdida de líquido desde la espuma y prolongando, por tanto, la vida útil de las burbujas. En consecuencia, la espuma resultante es más estable, persistente, densa y atractiva visualmente, proporcionando además una percepción táctil y sensorial mejorada en el consumidor.

Para lograr estos beneficios, el cervecero puede modular la viscosidad del producto mediante diferentes estrategias técnicas, tales como la selección de materias primas específicas (por ejemplo, maltas ricas en proteínas o cereales complementarios como avena o trigo), el ajuste cuidadoso del proceso de maceración para maximizar la extracción de beta-glucanos, o incluso mediante la incorporación de aditivos naturales estabilizantes autorizados. Estas prácticas incrementan la concentración de sustancias que, al acumularse en las interfaces de las burbujas, refuerzan sus paredes, frenan la velocidad del drenaje y previenen el colapso prematuro de la espuma.

3.7 El servicio

Charles W. Bamforth destaca que el modo en que se sirve la cerveza influye de forma decisiva en la formación y características de la espuma. Aunque la estabilidad espumante está determinada en gran medida por la composición química de la cerveza, el servicio constituye un factor físico crítico que puede potenciar o arruinar la expresión de esa espuma en la copa.

Uno de los aspectos clave que señala el autor es la manera en que se vierte la cerveza. Un vertido agresivo, por ejemplo dejando caer el líquido desde gran altura o sin inclinar el vaso, genera una rápida nucleación de burbujas debido al desprendimiento súbito de dióxido de carbono. Esto puede provocar una espuma excesiva y poco controlada, a menudo formada por burbujas grandes y frágiles que colapsan rápidamente. En contraste, un vertido más controlado —con el vaso inclinado y el flujo moderado— favorece la formación progresiva de burbujas finas, con mejor cohesión y persistencia.

Por último, el autor recuerda que la limpieza del vaso es esencial. Cualquier residuo de grasa, detergente o suciedad puede inhibir la formación de espuma al interferir con las fuerzas coloidales que estabilizan las burbujas. Incluso trazas de lípidos provenientes de los labios o de alimentos pueden ser suficientes para colapsar una espuma bien formada, y considera que el servicio no debe ser visto como un acto mecánico, sino como una extensión del proceso cervecero, capaz de realzar —o destruir— la calidad sensorial de la espuma. Un buen servicio, concluye, es el último eslabón en la cadena de producción de una gran cerveza.

4 Compuestos químicos que mejoran la formación y estabilidad de la espuma

4.1 Proteínas y polipeptidos

4.1.1 Proteína Z4

La Proteína Z4 es una de las proteínas más importantes identificadas en la cebada malteada (*Hordeum vulgare*), especialmente reconocida por su destacada contribución a la estabilidad y formación de la espuma en la cerveza. Perteneció al grupo de proteínas denominadas albúminas, solubles en agua, y es resistente al calor y al proceso de elaboración cervecera. Debido a esta estabilidad térmica y química, Z4 permanece intacta en gran medida durante la maceración, ebullición y fermentación del mosto, llegando a la cerveza terminada en cantidades significativas.

La Proteína Z4 tiene una estructura particular que le permite interactuar eficientemente en la interfase aire-líquido. Posee una secuencia rica en aminoácidos hidrofóbicos y grupos funcionales específicos capaces de establecer enlaces intermoleculares fuertes, lo que contribuye decisivamente a la formación de películas resistentes alrededor de las burbujas de gas.

Su papel fundamental reside en su capacidad para formar una capa adsorbida estable sobre las burbujas, proporcionando viscoelasticidad y resistencia mecánica. Esto reduce la velocidad del drenaje líquido desde las paredes de las burbujas, retrasando el adelgazamiento de estas capas, lo que resulta en una espuma más densa, cremosa y estable. Proteína Z4 interactúa también eficazmente con otros compuestos estabilizantes presentes en la cerveza, tales como los iso-alfa-ácidos del lúpulo y melanoidinas, formando redes moleculares complejas que aumentan la estabilidad global de la espuma.

La Proteína Z4 es una proteína naturalmente presente en la cebada (*Hordeum vulgare*) con marcada variabilidad según la variedad genética y condiciones agronómicas del cultivo. Existen diferencias genéticas relevantes entre las variedades de cebada que determinan no solo la concentración inicial, sino también la estabilidad térmica y funcionalidad espumante de Proteína Z4. Algunas variedades de cebada maltera, cuidadosamente seleccionadas por sus características proteicas, presentan niveles significativamente más altos y mejor calidad de Proteína Z4.

La calidad del grano influye directamente en la integridad estructural de Proteína Z4, destacando aspectos como: madurez uniforme del grano, bajo contenido de proteínas insolubles que dificulten la extracción, y un adecuado contenido proteico general (10-12%) que garantice presencia suficiente de Proteína Z4 sin exceso de proteínas que generen turbidez o sabores indeseados.

Durante el malteado, la cebada experimenta cambios profundos en su composición química y estructural que impactan directamente sobre la Proteína Z4. Este proceso consta de tres etapas clave: remojo, germinación y secado/tostado. Cada una afecta específicamente:

Remojo: La hidratación adecuada del grano facilita la movilización y futura disponibilidad de Proteína Z4.

Germinación: En esta fase, las enzimas endógenas de la cebada se activan, generando una degradación controlada de ciertas estructuras proteicas. Un tiempo y temperatura óptimos de germinación permiten liberar Proteína Z4 intacta o ligeramente modificada, haciéndola más accesible en las etapas posteriores. Una germinación demasiado prolongada podría generar excesiva proteólisis, degradando parcialmente Proteína Z4 y reduciendo su eficacia espumante.

Secado y tostado: Un secado suave y progresivo permite conservar la estructura nativa de Proteína Z4, asegurando estabilidad térmica y funcional. Secados demasiado intensos podrían provocar desnaturalización parcial, afectando negativamente su capacidad estabilizadora.

Sobre las condiciones de maceración (temperatura, duración y especialmente pH) tienen un papel central en la extracción y estabilidad estructural de Proteína Z4.

Una temperatura moderada de maceración (en rangos entre 60-68 °C) permite una extracción efectiva y conservadora de Proteína Z4. Temperaturas excesivamente altas podrían desnaturalizar parcialmente Proteína Z4, disminuyendo su capacidad de adsorción y estabilización de espuma.

El pH ideal durante la maceración para preservar la actividad de Proteína Z4 oscila entre 5,2 y 5,5. En estos rangos ligeramente ácidos, Proteína Z4 mantiene óptimas características de solubilidad y estructura nativa. Un pH demasiado alcalino o excesivamente ácido podría provocar cambios conformacionales, disminuyendo la eficacia espumante de esta proteína.

Un tiempo de maceración suficiente pero controlado permite maximizar la extracción y conservación íntegra de Proteína Z4, mientras que una duración excesivamente larga podría generar proteólisis innecesaria.

La Proteína Z4 posee una considerable resistencia térmica, pero no es inmune a cambios estructurales durante la cocción del mosto. Una cocción demasiado prolongada o agresiva puede llevar a una desnaturalización parcial o total de Proteína Z4, disminuyendo considerablemente su actividad estabilizadora. Sin embargo, un hervor suave a moderado puede favorecer la formación de complejos proteicos que contribuyen positivamente a la estabilidad final de la espuma.

Durante el hervor se forman iso-alfa-ácidos, que interactúan con Proteína Z4, fortaleciendo su capacidad estabilizante mediante complejos moleculares resistentes y estables. Un hervor adecuado asegura la formación óptima de estos complejos beneficiosos.

4.1.2 Proteína LTP1 (Lipid Transfer Protein 1)

LTP1 (Proteína de Transferencia de Lípidos tipo 1) también procede fundamentalmente de la cebada malteada. Forma parte de una familia específica de proteínas pequeñas (9-10 kDa), ricas en cisteína, altamente termoestables y resistentes a la proteólisis. Estas proteínas están presentes en diferentes cereales, pero en el contexto cervecero, la cebada es la principal fuente.

LTP1 posee una estructura tridimensional compacta, estabilizada por varios enlaces disulfuro intramoleculares (puentes entre residuos de cisteína). Esta configuración estructural compacta y resistente le permite sobrevivir intacta a las condiciones severas del proceso cervecero (altas temperaturas, cambios de pH y fermentación).

La presencia de un bolsillo interno hidrofóbico le permite interactuar y transportar lípidos, por lo que originalmente se la reconocía principalmente por su capacidad para movilizar compuestos lipídicos entre membranas celulares.

La importancia de LTP1 en la estabilidad espumante no se debe exclusivamente a su capacidad de transportar lípidos, sino especialmente a su fuerte adsorción en la interfase gas-líquido. Al adsorberse sobre las burbujas de gas (CO_2 o N_2), LTP1 forma una capa viscoelástica muy robusta que reduce drásticamente la coalescencia (unión y ruptura) de burbujas, preservando así la estructura de la espuma.

Al igual que la Proteína Z4, LTP1 interactúa con iso-alfa-ácidos del lúpulo y melanoidinas, formando complejos moleculares en la superficie de la burbuja que refuerzan la estabilidad global.

En conjunto, Protein Z4 y LTP1 juegan papeles sinérgicos en la estabilización y mantenimiento de la espuma cervecera. Ambas proteínas tienen en común una notable resistencia al proceso de elaboración, son capaces de adsorberse firmemente en las interfases gas-líquido y contribuyen significativamente a reducir el drenaje y la coalescencia de las burbujas.

4.1.3 Hordeína

Es una proteína presente en la cebada, que durante el proceso de malteado y elaboración cervecera sufre una degradación parcial, generando fragmentos proteicos más pequeños (polipéptidos derivados de la hordeína). Estos fragmentos participan activamente en la formación de espuma, aunque con menor capacidad estabilizadora que proteínas específicas como Proteína Z4 o LTP1.

Los fragmentos de hordeína contribuyen directamente a la formación inicial de espuma, favoreciendo la rápida adsorción y creación de una estructura espumosa inicial abundante.

Aunque poseen una adsorción menos estable y resistente en la interfase aire-líquido que otras proteínas más especializadas, estos polipéptidos facilitan la creación inicial y volumen espumoso.

La estabilidad proporcionada por la hordeína es moderada. Las capas proteicas formadas son menos resistentes frente al drenaje y colapso de burbujas en comparación con Proteína Z4 o LTP1. No obstante, en combinación con otras proteínas más efectivas, aportan una contribución positiva global a la persistencia de la espuma.

Estos polipéptidos específicos, especialmente la Proteína Z4 y LTP1, juegan un rol fundamental y sinérgico en la estabilidad de la espuma cervecera. Mientras Protein Z4 aporta especialmente elasticidad y resistencia mecánica, LTP1 ofrece firmeza y estabilidad estructural en la interfase de las burbujas. A su vez, los fragmentos derivados de Hordeína, aunque con menor impacto estabilizador, también colaboran en la formación y capacidad general de espuma. La interacción equilibrada y la concentración adecuada de estos polipéptidos es fundamental para obtener cervezas con espumas estables, duraderas y sensorialmente atractivas.

4.1.4 Complejos proteína-carbohidrato. Glucoproteínas

Uno de los aspectos destacados en el artículo “The Physics and Chemistry of Beer Foam” de Charles W. Bamforth es la importancia de los complejos formados entre proteínas y carbohidratos en la estabilidad de la espuma cervecera. Estos complejos, especialmente presentes en cervezas elaboradas con trigo, juegan un papel clave en la resistencia mecánica de la espuma y en su persistencia tras el servicio.

Las proteínas solubles del grano, como las gliadinas y gluteninas del trigo, presentan una mayor capacidad para formar películas espumantes debido a su conformación molecular y a su solubilidad en el medio cervecero. Cuando estas proteínas interactúan con polisacáridos solubles presentes en el mosto, como los arabinosilanos o las beta-glucanas, se generan complejos proteína-carbohidrato que se comportan como estructuras coloidales estables en la interfase gas-líquido de las burbujas.

Estos complejos actúan reforzando la película que recubre las burbujas de gas, aumentando su viscosidad y elasticidad. Como resultado, las burbujas presentan una mayor resistencia al drenaje del líquido, a la coalescencia con otras burbujas y al colapso. Esta propiedad explica por qué muchas cervezas de trigo, incluso con una carbonatación moderada, muestran espumas densas, cremosas y duraderas.

Además, la formación de estos complejos puede proteger a las proteínas espumantes frente a factores desestabilizantes como el etanol o los ácidos grasos libres. Los enlaces entre proteínas y carbohidratos limitan su desnaturalización y favorecen la retención de su capacidad funcional. Asimismo, las características del trigo, que contiene menos lípidos superficiales que la cebada, contribuyen indirectamente a este efecto estabilizador.

Bamforth subraya que este fenómeno no es exclusivo del trigo, pero sí más acentuado en su presencia, debido a su perfil proteico y a la mayor disponibilidad de carbohidratos solubles reactivos. Por tanto, la estabilidad de la espuma en las cervezas de trigo puede entenderse como el resultado de una sinergia molecular específica entre sus componentes solubles, más que de un único factor aislado.

4.2 Ácidos amargos del lúpulo

Los ácidos amargos del lúpulo, especialmente los iso-alfa-ácidos generados durante la ebullición del mosto, desempeñan un papel esencial en la estabilidad y calidad de la espuma en la cerveza. Estos compuestos provienen naturalmente del lúpulo (*Humulus lupulus*), estando inicialmente presentes como alfa-ácidos, sustancias con baja solubilidad y escasa actividad estabilizante en su estado natural. Sin embargo, durante la fase de cocción del mosto, estos alfa-ácidos sufren una transformación química conocida como isomerización térmica, dando lugar a los iso-alfa-ácidos, que son altamente solubles en el medio cervecero y poseen una notable capacidad para generar y mantener la espuma.

Desde una perspectiva química, los iso-alfa-ácidos presentan una estructura anfífila única, es decir, contienen regiones hidrofóbicas e hidrofílicas. Esta configuración molecular les permite adsorberse eficazmente en la interfase entre el gas (generalmente CO₂) y la fase líquida de la cerveza. Como resultado, los iso-alfa-ácidos forman una película superficial resistente que

envuelve las burbujas, aumentando considerablemente su estabilidad. Dicha capa retarda el drenaje del líquido atrapado en la espuma y reduce significativamente la coalescencia, fenómeno por el cual las burbujas pequeñas se fusionan en otras mayores, provocando el colapso acelerado de la estructura espumosa.

El mecanismo específico mediante el cual los iso-alfa-ácidos estabilizan la espuma involucra múltiples procesos. Uno de los más relevantes es la formación de complejos moleculares con proteínas estabilizadoras, destacando particularmente la Proteína Z4 y la Lipid Transfer Protein 1 (LTP1). Estos complejos refuerzan la resistencia mecánica y la elasticidad de la película que recubre las burbujas, permitiendo que la espuma se mantenga intacta durante períodos prolongados. Asimismo, esta interacción fortalece la resistencia frente al drenaje del líquido desde las paredes de las burbujas, contribuyendo a una espuma más cremosa y persistente. Paralelamente, la presencia de estos complejos reduce considerablemente la coalescencia de burbujas, ayudando a mantener la estructura espumosa homogénea y estable.

La eficacia estabilizadora de los iso-alfa-ácidos depende significativamente de diversos factores. Por ejemplo, el nivel de adición de lúpulo en la receta cervecera determina directamente la concentración final de iso-alfa-ácidos, afectando así la estabilidad final de la espuma. Aunque mayores concentraciones de estos compuestos suelen incrementar la estabilidad espumante, es necesario equilibrar cuidadosamente su cantidad, ya que niveles excesivos podrían afectar negativamente al perfil sensorial de la cerveza final. Por otra parte, las condiciones de cocción, especialmente la duración e intensidad del hervor, deben controlarse con precisión para optimizar la formación y conservación de iso-alfa-ácidos activos. Finalmente, la interacción equilibrada con otras proteínas y fragmentos polipeptídicos presentes en la cerveza, como Proteína Z4, LTP1 y fragmentos derivados de hordeína, potencia aún más la capacidad estabilizante de estos ácidos amargos.

Los iso-alfa-ácidos del lúpulo representan uno de los factores químicos fundamentales para asegurar una espuma de cerveza estable, duradera y visualmente atractiva. Su capacidad para interactuar eficazmente con proteínas específicas y formar películas resistentes en la superficie de las burbujas permite retardar significativamente el drenaje y minimizar la coalescencia, garantizando así una experiencia sensorial óptima en la degustación del producto.

4.3 Iones metálicos

Los iones metálicos presentes en la cerveza, como el calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), hierro ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$) y zinc (Zn^{2+}), desempeñan un papel relevante en los mecanismos químicos que regulan la formación y estabilidad de la espuma. Aunque no son agentes espumantes por sí mismos, su presencia influye de forma indirecta pero sustancial sobre las interacciones moleculares que determinan la calidad de la espuma.

Uno de los principales efectos de los iones metálicos es su capacidad para modular las interacciones entre proteínas y polipéptidos estabilizantes, como la Proteína Z4 y LTP1. Al formar enlaces iónicos o puentes de coordinación con estos compuestos, los iones metálicos ayudan a fortalecer las estructuras que se forman en la interfase gas-líquido, especialmente en la superficie de las burbujas. Este refuerzo estructural incrementa la rigidez y elasticidad de la película que envuelve las burbujas, mejorando su resistencia al drenaje y a la coalescencia.

En particular, el calcio y el magnesio han demostrado tener un efecto estabilizador positivo. Ambos iones pueden inducir la agregación controlada de proteínas espumantes en la superficie de las burbujas, creando una red proteica más robusta. Estos efectos son dependientes de la concentración: niveles adecuados de calcio y magnesio fortalecen la espuma, mientras que concentraciones demasiado elevadas pueden precipitar proteínas o alterar el equilibrio coloidal del sistema cervecero.

Por otro lado, el artículo también menciona que el zinc (Zn^{2+}) es especialmente importante durante la fermentación, al actuar como cofactor enzimático para la levadura. Sin embargo, una pequeña fracción de este ion puede permanecer en la cerveza terminada, donde también participa en la estabilización de proteínas espumantes. En cambio, el hierro, aunque puede contribuir a interacciones iónicas, está generalmente asociado con efectos negativos sobre la estabilidad oxidativa de la cerveza, y su presencia debe mantenerse bajo control para evitar reacciones de oxidación que perjudiquen tanto el sabor como la estabilidad de la espuma.

Los iones metálicos actúan como moduladores de la red estabilizante de la espuma, especialmente al facilitar la formación de complejos entre proteínas espumantes y otros componentes químicos de la cerveza. Su influencia, aunque indirecta, es crucial para reforzar la integridad estructural de la espuma y prolongar su persistencia. El control de su concentración en el proceso cervecero, desde el agua utilizada hasta los aditivos en la cocción, es un factor técnico importante para los cerveceros que buscan optimizar la presentación visual y la calidad sensorial del producto final.

4.4 Melanoidinas

Las melanoidinas son compuestos de alto peso molecular que se forman durante las reacciones de Maillard, especialmente en el secado de la malta y la cocción del mosto. Estas reacciones no enzimáticas entre azúcares reductores y aminoácidos producen una amplia gama de pigmentos y polímeros marrones que no solo aportan color y sabor a la cerveza, sino que también influyen notablemente en la formación y estabilidad de la espuma.

Desde el punto de vista químico, las melanoidinas tienen una estructura coloidal y compleja, con múltiples grupos funcionales que permiten su interacción con proteínas, polipéptidos y otras macromoléculas. Esta capacidad de interacción es clave para su contribución a la espuma, ya que permite la formación de redes moleculares en la superficie de las burbujas. Al integrarse en la película interfacial, las melanoidinas ayudan a reforzar su rigidez y a reducir el drenaje, mejorando así la persistencia de la espuma.

El artículo subraya que las melanoidinas también actúan como agentes protectores frente a procesos de oxidación, lo que indirectamente beneficia a la espuma. La oxidación puede degradar proteínas espumantes o generar productos tensoactivos que debilitan la película que recubre las burbujas. Al ejercer una acción antioxidante, las melanoidinas contribuyen a preservar la integridad de los compuestos estabilizantes presentes en la cerveza.

Otro aspecto destacado es que las melanoidinas pueden interactuar sinérgicamente con los iso-alfa ácidos del lúpulo y proteínas como Z4 y LTP1. Estas interacciones potencian la formación de una estructura más densa y cohesionada en la capa superficial de la espuma, lo

que incrementa su resistencia mecánica y prolonga su duración.

En definitiva, las melanoidinas no solo son responsables de características organolépticas importantes como el color y el sabor tostado, sino que también cumplen una función relevante en la arquitectura molecular de la espuma cervecera. Su presencia refuerza la estabilidad del sistema coloidal que sostiene la espuma, convirtiéndolas en un componente clave en el diseño de cervezas con espuma abundante, persistente y estéticamente atractiva.

5 Agentes antiespumantes

En el artículo “The Physics and Chemistry of Beer Foam” de Charles W. Bamforth, se identifican diversos agentes químicos y físicos que perjudican gravemente la formación y estabilidad de la espuma en la cerveza. Estos compuestos, ya sea por acción directa sobre la película que rodea las burbujas o por interferencia con los estabilizantes naturales del mosto, pueden provocar la rápida desaparición de la espuma, incluso en cervezas correctamente elaboradas.

Uno de los agentes más destacados por su efecto desestabilizador es el etanol. Aunque el alcohol es parte integral de la cerveza, a concentraciones elevadas actúa como un tensioactivo que disminuye la tensión superficial del líquido. Esta disminución debilita la película proteica que rodea las burbujas, haciendo que se rompan con mayor facilidad. En consecuencia, cuanto mayor es el contenido alcohólico de la cerveza, más vulnerable se vuelve la espuma a un colapso prematuro.

Los lípidos, incluyendo grasas y aceites, son señalados como los compuestos más agresivos contra la espuma. Su naturaleza hidrofóbica les permite adsorberse en la interfaz aire-líquido de las burbujas, donde interrumpen las interacciones entre proteínas estabilizantes como LTP1 o Protein Z4. Esta interferencia rompe la cohesión de la película superficial, provocando la disolución inmediata de la estructura espumosa. Las fuentes más comunes de lípidos antiespumantes incluyen residuos de alimentos, aceites de cocina y contacto con labios humanos, así como contaminaciones cruzadas durante el servicio o en recipientes mal lavados.

En ese sentido, los detergentes mal aclarados también representan una amenaza significativa. Estos agentes de limpieza contienen tensioactivos diseñados específicamente para romper estructuras coloidales, como las que forman la espuma. Incluso en cantidades traza, un residuo de detergente puede impedir por completo la formación de espuma o hacerla desaparecer en cuestión de segundos. Por ello, el enjuague exhaustivo de cristalería y equipos de servicio es crucial para preservar la integridad espumante de la cerveza.

El exceso de polifenoles, como los taninos provenientes del grano o del lúpulo, puede tener un efecto doble. En pequeñas cantidades, pueden formar complejos con proteínas que benefician la estabilidad de la espuma. Sin embargo, cuando se encuentran en exceso, inducen la agregación y precipitación de proteínas útiles, eliminando del sistema a varios estabilizadores clave. Este desequilibrio puede perjudicar tanto la claridad como la persistencia de la espuma.

También se menciona el efecto negativo de los ácidos grasos libres, que pueden derivar de materias primas deterioradas, especialmente maltas mal almacenadas o sometidas a actividad

microbiana. Estos ácidos grasos, aunque menos potentes que los lípidos completos, tienen una estructura lo suficientemente tensoactiva como para insertarse en la capa interfacial de las burbujas y romper su cohesión.

Finalmente, las contaminaciones microbiológicas, como la presencia de levaduras salvajes o bacterias, afectan de manera indirecta pero significativa la espuma. Algunos microorganismos liberan enzimas como proteasas o lipasas, que degradan las proteínas estabilizantes o liberan lípidos intracelulares, ambos efectos altamente perjudiciales para la formación y mantenimiento de la espuma.

En conjunto, el artículo de Bamforth subraya que preservar una buena espuma cervecera no solo depende de promover factores estabilizantes, sino también de evitar con rigor la presencia de estos agentes destructivos. La limpieza, la integridad de los ingredientes y el control microbiológico son aspectos fundamentales para asegurar una presentación espumosa adecuada y duradera.

6 Análisis dinámico de formación y estabilidad de espuma

En *The Physics and Chemistry of Beer Foam*, Charles W. Bamforth plantea una propuesta innovadora para el estudio de la espuma cervecera: la aplicación de modelos cinéticos similares a los empleados en estudios enzimáticos como herramienta para interpretar y analizar la dinámica de formación y estabilidad de la espuma.

De manera análoga a cómo enzimólogos utilizan ecuaciones como la de Michaelis-Menten para describir la velocidad de reacción en función de la concentración de sustratos, Bamforth sugiere que la espuma puede estudiarse mediante modelos matemáticos que describan la evolución temporal de variables clave, tales como: - La tasa de formación de burbujas por nucleación. - El drenaje del líquido intersticial que rodea las burbujas. - La velocidad de coalescencia (fusión) y colapso de burbujas. - La estabilidad de la película superficial en función de la concentración de estabilizantes como proteínas o iso-alfa ácidos.

Este enfoque permite transformar el estudio de la espuma en un sistema dinámico cuantificable, lo que posibilita comparar el comportamiento espumante bajo distintas condiciones experimentales: temperatura, tipo de grano, grado de carbonatación, contenido alcohólico, entre otros factores.

Además, mediante el análisis cinético, los cerveceros pueden identificar puntos críticos de inestabilidad o diseñar estrategias para maximizar la duración de la espuma en estilos que dependen fuertemente de su presencia visual y sensorial. También puede aplicarse para modelar el efecto de aditivos estabilizantes o desestabilizantes en tiempo real.

La propuesta de Bamforth amplía el marco tradicional de evaluación de la espuma cervecera, al ofrecer una herramienta analítica basada en cinética físico-química, útil tanto para la investigación académica como para la optimización técnica del producto en contextos industriales.

7 Conclusiones

La espuma es uno de los elementos más característicos y apreciados de la cerveza, tanto por su valor sensorial como por su relevancia visual y comercial. Su formación y estabilidad dependen de una interacción compleja entre factores físicos —como la nucleación, el tamaño de las burbujas o la presión del gas— y factores químicos —como proteínas, polipéptidos, compuestos del lúpulo, iones metálicos y melanoidinas—. El artículo de Bamforth ofrece una revisión exhaustiva que permite comprender cómo cada uno de estos elementos contribuye a construir una espuma densa, cremosa y duradera.

Desde el punto de vista físico, fenómenos como la nucleación en puntos activos del recipiente, la disproporcionación (intercambio de gas entre burbujas de diferente tamaño), el drenaje gravitacional del líquido y la ruptura por coalescencia definen la dinámica de formación y colapso de la espuma. La elección del gas (CO_2 o N_2), el grado de carbonatación y la geometría del vaso influyen decisivamente en estos procesos, determinando la calidad y persistencia de la espuma en cada servicio.

En el plano químico, la espuma cervecera se sustenta en una red tridimensional de proteínas y polipéptidos funcionales —especialmente Proteína Z4, LTP1 y fragmentos de hordeína—, reforzada por la interacción con iso-alfa-ácidos del lúpulo, que aportan tensión superficial y mejoran la elasticidad de la película espumante. A estos se suman los iones metálicos (como Ca^{2+} y Ca^{2+}), que estabilizan enlaces moleculares, y las melanoidinas, que refuerzan la película en la interfase burbuja-líquido y actúan como antioxidantes.

El equilibrio entre estos factores puede verse fácilmente alterado por la presencia de compuestos desestabilizantes, como lípidos, etanol o residuos detergentes, que comprometen la integridad de las burbujas y aceleran el colapso de la espuma. Por ello, la limpieza del equipo, la selección cuidadosa de materias primas y el diseño del proceso cervecero resultan fundamentales para preservar la calidad espumante.

En conclusión, Bamforth demuestra que la espuma de cerveza es el resultado de un delicado balance entre física y química. Entender estos mecanismos no solo permite optimizar la elaboración y presentación del producto, sino que ofrece una vía para mejorar la percepción del consumidor y reforzar la identidad sensorial de cada estilo cervecero. La espuma, lejos de ser un simple atributo estético, es una manifestación tangible de la ciencia que hay detrás de una buena cerveza.

8 Bibliografía

Bamforth, C. W. (2023). The physics and chemistry of beer foam: A review. *European Food Research and Technology*, 249(1), 3–11. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04134-4>