

**Evaluación y estandarización en la reducción de diacetilo en una cerveza lager por cambio
de cepa de levadura cervecera**

Gabriel Londoño Ochoa

Asesora

Leidy Johanna Gómez Sampedro

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería
Ingeniería de Alimentos

2026

Nota de Aceptación

Nombre Director de Trabajo de Grado

Jurado

Jurado

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a mi querida familia, cuyo amor, apoyo y aliento incondicional me han acompañado en cada paso de este camino. Gracias por creer en mí y por estar siempre a mi lado en los momentos de duda y celebración. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo de grado.

En primer lugar, agradezco a mi asesor Leidy Johana Gómez, por su invaluable apoyo, orientación y paciencia a lo largo de este proceso. Su conocimiento y consejos me han guiado en cada etapa y han sido fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Agradezco también a mis profesores y compañeros de la UNAD por sus aportes y motivación. Cada conversación y cada crítica constructiva han enriquecido mi aprendizaje y han contribuido a la calidad de este trabajo.

A mis amigos y familiares, gracias por su apoyo incondicional y por estar siempre a mi lado, incluso en los momentos más desafiantes. Su confianza en mí ha sido una fuente de inspiración. Finalmente, agradezco a todas las personas y recursos que, de alguna manera, han influido en mi formación y en la elaboración de este trabajo. Sin su apoyo, esto no habría sido posible.

Resumen

El diacetilo es un subproducto indeseable generado por las levaduras durante la fermentación cervecera y que afecta negativamente la calidad sensorial en concentraciones elevadas; en etapas finales del proceso las levaduras pueden reabsorberlo reduciendo el impacto en las características organolépticas de la cerveza. El objetivo de este estudio fue evaluar y estandarizar la reducción de diacetilo en una cerveza tipo lager mediante el cambio de cepa de levadura cervecera. En el diseño metodológico se incluyeron las cepas *Saccharomyces cerevisiae* ITQ y *Saccharomyces pastorianus* ITW900F para fermentación de cerveza tipo lager con monitoreo de los niveles de diacetilo por cromatografía de gases. La cepa *S. pastorianus* ITW900F presentó una reducción más rápida del diacetilo con niveles inferiores a 100 ppb llegado el sexto día de la fermentación, en contraste con el proceso tradicional que tarda nueve días con valores superiores de diacetilo en marcas como Club Colombia, Pilsen, estándar y light. Los resultados sugieren que el cambio de cepa puede optimizar el proceso de fermentación, reducir el diacetilo de forma más eficiente y conservar la calidad sensorial de la cerveza.

Palabras clave: diacetilo, fermentación, levadura, cromatografía de gases

Abstract

Diacetyl is an undesirable by-product generated by yeast during beer fermentation that can negatively affect sensory quality when present at elevated concentrations. During the final stages of the process, yeast cells are capable of reabsorbing diacetyl, thereby reducing its impact on the organoleptic properties of beer. The objective of this study was to evaluate and standardize diacetyl reduction in a lager beer through the substitution of the brewing yeast strain. The methodological design included the yeast strains *Saccharomyces cerevisiae* ITQ and *Saccharomyces pastorianus* ITW900F for lager beer fermentation, with diacetyl level monitored by gas chromatography. The strain *S. pastorianus* ITW900F exhibited a faster reduction of diacetyl, reaching concentrations below 100 ppb by the sixth day of fermentation. In contrast, the traditional process required nine days and resulted in higher diacetyl levels in commercial beer products such as Club Colombia, Pilsen, Standard and Light. The results suggest that changing the yeast strain can optimize the fermentation process, achieve more efficient diacetyl reduction and preserve the sensory quality of the beer.

Keywords: diacetyl, fermentation, yeast, gas chromatography

Tabla de Contenido

Introducción	11
Planteamiento del Problema	13
Hipótesis de Investigación	15
Hipótesis 1	15
Hipótesis 2	15
Justificación	16
Objetivos	18
Objetivo General	18
Objetivos Específicos	18
Marco Teórico	19
Materias Primas	19
Agua	19
Lúpulo	20
Cebada	20
Levadura	20
Características de las Levaduras Cerveceras	21
Descripción del Proceso Cervecerero	22
Fermentación Alcohólica	23
Cerveza Tipo Lager y Defectos Sensoriales	23
Diacetilo	25
Factores que Influyen en la Formación y Reducción de Diacetilo	28
Descanso de Diacetilo	29
Metodología	30
Conteo Celular	30
Determinación de la Viabilidad Celular	30
Fase de Laboratorio: Propagación de Levadura	31
Escalado en Planta y Fermentación	32
Determinación de Diacetilo	33
Análisis de la Evolución del Diacetilo	33
Proceso de Fermentación	33

Determinación de Diacetilo en Producto Terminado	34
Análisis Físicoquímicos del Producto Terminado	35
Contenido de Alcohol	35
Extracto	35
pH.....	35
Turbidez	36
Toma de Muestras	36
Análisis de Resultados y Discusión	38
Análisis de Conteo y Viabilidad de Levadura en la Propagación	38
Interpretación de la Viabilidad y Propagación de la Levadura	40
Impacto del Cambio de Cepa de Levadura en el Proceso.....	40
Relación con la Reducción de Diacetilo	41
Diacetilo.....	41
Comparación de Eficiencia entre Levadura 1 y Levadura 2.....	47
Rapidez de Reducción de Diacetilo	48
Niveles Finales de Diacetilo	48
Consistencia del Proceso entre Tipos de Cerveza.....	48
Conclusiones.....	51
Recomendaciones	52
Referencias Bibliográficas	53

Lista de Figuras

Figura 1	Fases de la levadura.....	21
Figura 2	Diagrama de flujo del proceso cervecero	22
Figura 3	Ruta metabólica de la fermentación	23
Figura 4	Comportamiento del diacetilo en producción de cerveza Club Colombia.....	45
Figura 5	Comportamiento del diacetilo en producción de cerveza estándar	45
Figura 6	Comportamiento del diacetilo en producción de cerveza light	46
Figura 7	Comportamiento del diacetilo en producción de cerveza Pilsen.....	46
Figura 8	Análisis estadístico de la reducción de diacetilo	49

Lista de Tablas

Tabla 1	Off flavors en cerveza lager	24
Tabla 2	Parámetros del proceso de fermentación.....	34
Tabla 3	Resultados físicoquímicos del producto terminado.....	36
Tabla 4	Propagación 2, levadura <i>S. cerevisiae</i> ITW	38
Tabla 5	Propagación 2, levadura <i>S. pastorianus</i> ITW900F	38
Tabla 6	Propagación 3	39
Tabla 7	Producción de diacetilo por cepa anterior	41
Tabla 8	Producción de diacetilo por cepa nueva	43

Introducción

La cerveza, considerada la tercera bebida más consumida en el mundo después del té y el café, posee una gran relevancia cultural, ya que es empleada como acompañante de comidas y es una de las bebidas más utilizadas en reuniones sociales. Se ha postulado que su origen se remonta a las primeras civilizaciones desarrolladas en Mesopotamia y el antiguo Egipto (Sannino et al., 2019), razón por la cual ha mantenido una tradición propia en las diferentes regiones en cuanto a su producción y consumo. En la actualidad, cuenta con un mercado significativo y procesos industrializados a gran escala que garantizan su oferta y distribución (Cabras & Higgins, 2016).

La cerveza es una bebida acuosa fermentada a base de almidón y aromatizada con lúpulo, considerada una mezcla compleja que contiene más de 450 constituyentes. Esta bebida alcohólica, ampliamente consumida y estudiada, se elabora principalmente a partir de cuatro ingredientes: cebada malteada, levadura, lúpulo y agua. No obstante, durante su elaboración pueden añadirse otros componentes, como maltas especiales, carbohidratos y cereales no malteados (maíz, sorgo, centeno, avena y trigo, entre otros), lo que da lugar a una matriz que incluye macromoléculas como proteínas, ácidos nucleicos, polisacáridos y lípidos (Steiner et al., 2010). El lúpulo, por su parte, determina en gran medida características típicas de la cerveza, como el sabor amargo y la estabilidad de la espuma (De Keukeleire, 2000).

La elaboración de cerveza comprende una serie de etapas consecutivas e interdependientes que influyen directamente en el producto final, incluyendo la maceración del grano de malta molido, la recirculación, la cocción del mosto y la posterior adición de levadura a una temperatura de fermentación preestablecida. En este proceso, las levaduras desempeñan un papel fundamental, ya que la selección de cepas es clave para mantener la calidad sensorial de la

bebida. Durante la fermentación, estas generan numerosos metabolitos secundarios que influyen en el perfil sensorial, como ésteres, alcoholes superiores, compuestos de azufre, ácidos orgánicos, aldehídos y cetonas, entre ellas el diacetilo, el cual tiene un impacto directo en el aroma y sabor del producto final (Carneiro & Meleiro, 2011; Jesús Callejo et al., 2020).

Actualmente, las cervezas se clasifican en dos grandes grupos según el tipo de fermentación: las de fermentación alta, que incluyen Ales, Stouts y cervezas de trigo, y las de fermentación baja o en el fondo, como Lager, Dark Lager, Pilsner, Bocks y Märzen.

La cerveza también se ha consolidado como un componente importante en la dieta de diversas culturas, no solo por su contenido de alcohol (etanol), producido mediante la fermentación controlada del mosto, sino también por su aporte de compuestos nutricionales como carbohidratos y proteínas. En este sentido, se considera una bebida rica en carbohidratos (como la glucosa), compuestos nitrogenados, compuestos de azufre y oligoelementos provenientes de la cebada malteada (Štěrbá et al., 2015).

En este contexto, el objetivo del presente trabajo se enfoca en disminuir el tiempo de reducción del diacetilo de nueve a seis días en la producción de cerveza tipo lager, mediante la evaluación de diferentes cepas de levadura y la identificación de variables críticas del proceso, como la temperatura, el pH, la concentración de levadura y la aireación.

Planteamiento del Problema

El diacetilo es un compuesto orgánico que se forma durante la fermentación de la cerveza como un subproducto del metabolismo de la levadura, y que puede impartir un sabor y aroma a mantequilla no deseado en el producto final. Su presencia en concentraciones elevadas es generalmente considerada un defecto sensorial en la cerveza, aunque en ciertos estilos puede ser aceptable en pequeñas cantidades. Por esta razón, la reducción del diacetilo constituye una etapa crítica dentro del proceso de producción cervecera y depende en gran medida de la actividad metabólica de la levadura durante las fases finales de fermentación y maduración (Gigliarelli, 2007).

Actualmente, la levadura utilizada en la producción de cerveza tipo lager en Cervecería Unión presenta un comportamiento poco eficiente en la reducción del diacetilo durante la etapa final del proceso de fermentación. Ante esta situación, surge la necesidad de evaluar el desempeño de una nueva cepa de levadura desarrollada en la cervecería, con el fin de compararla con la cepa actualmente utilizada y determinar si su implementación podría contribuir a reducir el tiempo total de fermentación a aproximadamente seis días. Esta optimización del proceso podría generar beneficios en términos de reducción de los tiempos de producción, mayor disponibilidad de producto, así como posibles mejoras en el perfil sensorial y en la estabilidad del producto final.

No obstante, el cambio de cepa de levadura representa una modificación significativa dentro del proceso cervecero, ya que puede influir directamente en diferentes etapas de la fermentación, afectando los tiempos del proceso, la ocupación de los tanques de fermentación, el perfil sensorial de la cerveza terminada y su estabilidad fisicoquímica. Por esta razón, resulta necesario realizar un estudio detallado que permita evaluar tanto los posibles beneficios como las

implicaciones asociadas a la implementación de esta nueva cepa de levadura en el proceso productivo.

Hipótesis de Investigación

Hipótesis 1

La nueva cepa de levadura *Saccharomyces pastorianus* ITW900F producirá menores concentraciones iniciales de diacetilo en comparación con la cepa actualmente utilizada, debido a diferencias en su metabolismo y en las condiciones de fermentación.

Hipótesis 2

La nueva cepa de levadura *Saccharomyces pastorianus* ITW900F presentará una mayor eficiencia en la reducción del diacetilo durante la fase de acondicionamiento, en comparación con la cepa actualmente utilizada.

En este contexto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible disminuir el tiempo de reducción de diacetilo en la producción de cerveza tipo lager mediante la evaluación de diferentes cepas de levadura?

Justificación

El diacetilo es un compuesto químico que genera un perfil de sabor indeseable en la cerveza, por lo que su presencia en altas concentraciones es considerada un defecto sensorial. En consecuencia, su reducción constituye un objetivo fundamental en la elaboración de cervezas de alta calidad. Este compuesto se clasifica como una dicetona vecinal, debido a que presenta dos grupos cetónicos adyacentes en su estructura molecular. La degradación de estas dicetonas ocurre en paralelo con otros procesos de maduración de la cerveza, razón por la cual se consideran indicadores clave del grado de maduración.

Durante su metabolismo, la levadura produce únicamente los precursores de las dicetonas vecinales, los cuales carecen de aroma y sabor, por lo que no son detectables en la cerveza. El diacetilo formado puede ser posteriormente degradado por la misma levadura, lo que permite reducir su impacto negativo en el perfil sensorial. Este proceso se lleva a cabo mediante una reducción secuencial: diacetilo \rightarrow acetoína \rightarrow 2,3-butanodiol (Kunze & Manger, 2014).

El estudio de este compuesto resulta fundamental para evaluar el impacto de nuevas cepas de levadura, dado que tanto su formación como su reducción dependen en gran medida de la cepa utilizada. Además, el diacetilo es un compuesto crítico, ya que su presencia en niveles elevados afecta negativamente el sabor y el aroma de la cerveza. Su reducción ocurre principalmente en la fase final de la fermentación, a temperaturas entre 14 y 16 °C, etapa conocida como “descanso de diacetilo”. Esta fase debe mantenerse hasta alcanzar concentraciones inferiores a 100 ppb (Master Brewers Association of the Americas, s. f.).

Considerando que diferentes cepas de levadura producen y consumen diacetilo a ritmos distintos, resulta fundamental identificar la cepa más adecuada para la elaboración de cerveza tipo lager. Esta elección puede contribuir significativamente a mejorar la calidad del producto,

permitiendo obtener un perfil de sabor limpio y acorde con las características del estilo. Asimismo, la selección de cepas con una reducción consistente de diacetilo favorece la uniformidad del producto entre lotes, lo cual es esencial para fortalecer la fidelidad del consumidor y la reputación de la marca.

Otra razón que justifica el desarrollo de este estudio es la necesidad de cumplir con los estándares de estilo, ya que cada tipo de cerveza presenta distintos niveles de tolerancia al diacetilo. En este sentido, un análisis detallado de diferentes cepas permite ajustar los procesos de fermentación para satisfacer las exigencias de cada estilo, incrementando la competitividad en mercados especializados. De igual manera, la investigación en nuevas cepas de levadura y su impacto en la formación y reducción del diacetilo promueve la innovación en la industria cervecera, proporcionando herramientas y conocimientos para el desarrollo de nuevos productos y la optimización de los existentes (Strong & England, 2022). En consecuencia, los resultados de este estudio pueden orientar la selección de la levadura más adecuada según el perfil sensorial deseado y el control de defectos en la cerveza, así como mejorar las prácticas de fermentación y acondicionamiento.

Finalmente, entre los beneficios esperados con la implementación de una nueva cepa de levadura en la cervecería, se destaca la reducción del tiempo de fermentación de nueve a seis días. Esto tendría un impacto directo en la productividad de la empresa, al permitir una mayor disponibilidad de tanques fermentadores en menor tiempo, lo que incrementaría la capacidad de producción sin necesidad de realizar inversiones significativas en nuevos equipos.

Objetivos

Objetivo General

Disminuir el tiempo de degradación del diacetilo de nueve a seis días en la producción de cerveza tipo lager, mediante la evaluación de diferentes cepas de levadura.

Objetivos Específicos

Comparar el comportamiento de dos cepas de levadura cervecera durante la fermentación de cerveza tipo lager, mediante el seguimiento de la concentración de diacetilo

Verificar que la cerveza producida con la nueva cepa cumpla con los estándares de calidad, en términos de parámetros fisicoquímicos y reproducibilidad del producto final.

Marco Teórico

La cerveza es una bebida alcohólica no destilada, de sabor característicamente amargo, elaborada a partir de granos de cebada u otros cereales cuyo almidón es fermentado en agua mediante la acción de levaduras, principalmente *Saccharomyces cerevisiae* o *Saccharomyces pastorianus*, y generalmente aromatizada con lúpulo, entre otras plantas. A nivel mundial existen múltiples tipos de cerveza, cada uno con características particulares de aroma, sabor, color y cuerpo, que en muchos casos reflejan las tradiciones de las regiones donde se originaron. Aunque todas se producen a partir de los mismos ingredientes básicos —cebada malteada, lúpulo, levadura y agua—, las diferencias entre ellas radican en la variación de estas materias primas y en el tipo de fermentación empleado (Moolemane et al., 2025).

La cerveza tipo Ale, por ejemplo, se originó en Baviera durante la época medieval y posteriormente se convirtió en uno de los estilos predominantes a nivel mundial. Este tipo de cerveza se obtiene mediante fermentación alta, utilizando cepas de *Saccharomyces cerevisiae*, denominadas así porque parte de la levadura asciende y forma una capa superficial durante la fermentación. Este proceso ocurre a temperaturas cercanas a 20 °C, es relativamente rápido y produce cervezas con mayor contenido alcohólico y perfiles aromáticos más intensos (Moolemane et al., 2025).

Materias Primas

Agua

El agua constituye aproximadamente el 90 % del contenido de la cerveza y es un factor determinante en su calidad. Su composición mineral influye tanto en el sabor como en las reacciones enzimáticas y coloidales durante el proceso de elaboración. Debe ser potable, libre de olores y sabores indeseables, con un contenido equilibrado de sales y sin materia orgánica.

Elementos como el calcio, sodio, potasio y sulfatos afectan directamente el perfil sensorial y el comportamiento del proceso. Por ejemplo, el calcio contribuye a reducir el pH y favorece la floculación de la levadura, mientras que los sulfatos potencian el sabor seco de la cerveza. Las aguas blandas son preferidas para cervezas tipo Pilsen, mientras que aguas más duras se utilizan en cervezas oscuras (Kunze & Manger, 2014).

Lúpulo

El lúpulo es responsable del amargor y del aroma característico de la cerveza. Se utilizan principalmente las flores femeninas no fecundadas de esta planta dioica, perteneciente a la familia Cannabaceae. Los lúpulos se clasifican generalmente en amargos y aromáticos: los primeros contienen altas concentraciones de ácidos alfa responsables del amargor, mientras que los segundos aportan perfiles aromáticos más complejos (Kunze & Manger, 2014).

Cebada

La cebada (*Hordeum vulgare*) es el cereal más utilizado en la elaboración de cerveza debido a su alto contenido de almidón y a su adecuada composición proteica, que favorece el crecimiento de la levadura. Durante el malteado, el grano debe absorber agua y germinar de manera uniforme, permitiendo la acción de enzimas como las amilasas durante la maceración (Kunze & Manger, 2014).

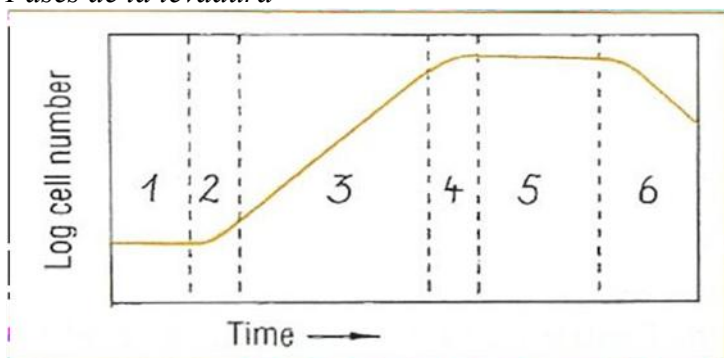
Levadura

Las levaduras son hongos unicelulares ampliamente utilizados en la producción de alimentos fermentados. Existen más de 1 500 especies, aunque en la industria cervecera predominan las del género *Saccharomyces*, debido a su alta capacidad de producción de alcohol y tolerancia a este compuesto (Brock, 2015; Minnaar et al., 2019).

En la figura 1 podemos observar el crecimiento de la levadura durante la fermentación el cual sigue seis fases: latencia, aceleración, exponencial, deceleración, estacionaria y declinante. Estas etapas están influenciadas por factores como la temperatura, la disponibilidad de nutrientes y el estado fisiológico de la levadura (Kunze & Manger, 2014)

Figura 1

Fases de la levadura



Fuente. Kunze y Manger, 2014.

Características de las Levaduras Cerveceras

Las levaduras de fermentación alta y baja presentan diferencias morfológicas y fisiológicas. Las levaduras de fermentación alta forman cadenas celulares y tienen mayor actividad respiratoria, mientras que las de fermentación baja se presentan en pares y predominan en el metabolismo fermentativo. Además, difieren en su capacidad de fermentar compuestos como la rafinosa y en su comportamiento de floculación (Kunze & Manger, 2014).

Desde el punto de vista tecnológico, las levaduras de fermentación alta operan a temperaturas entre 14 y 25 °C, mientras que las de fermentación baja lo hacen entre 4 y 12 °C, lo cual influye directamente en el perfil sensorial de la cerveza.

Descripción del Proceso Cervecerero

El proceso de elaboración de la cerveza consta de tres etapas principales: cocción, fermentación y maduración.

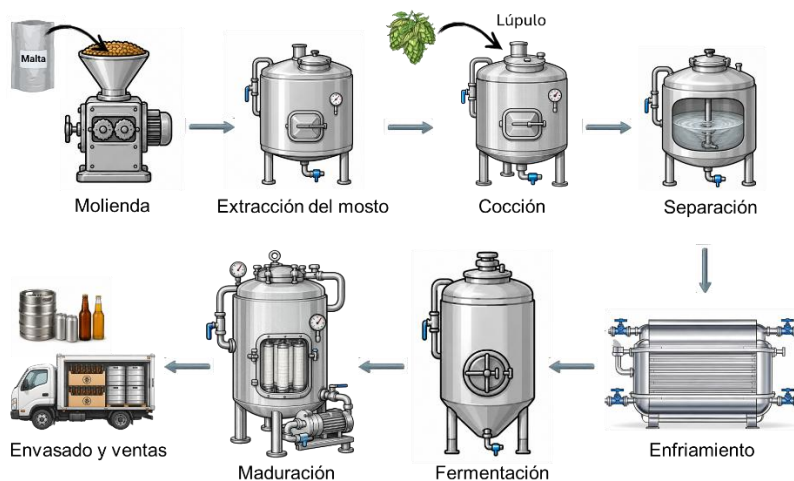
En la etapa de cocción se produce el mosto mediante la maceración de la malta, la filtración y la cocción con lúpulo. Posteriormente, el mosto se clarifica en el whirlpool y se enfría antes de la fermentación (Kunze & Manger, 2014).

Durante la fermentación, la levadura transforma los azúcares en etanol y dióxido de carbono, además de generar compuestos que contribuyen al aroma y sabor. El producto obtenido en esta fase se denomina “cerveza verde” y requiere un proceso de maduración a bajas temperaturas para estabilizar sus características sensoriales.

Finalmente, la cerveza es filtrada para eliminar sólidos y levaduras, y posteriormente envasada en diferentes presentaciones. Para garantizar su estabilidad microbiológica, suele ser pasteurizada (Brewing & Quality Director, 2023). En la figura 2 se muestra un diagrama de flujo de un proceso tradicional de elaboración de cerveza.

Figura 2

Diagrama de flujo del proceso cervecero

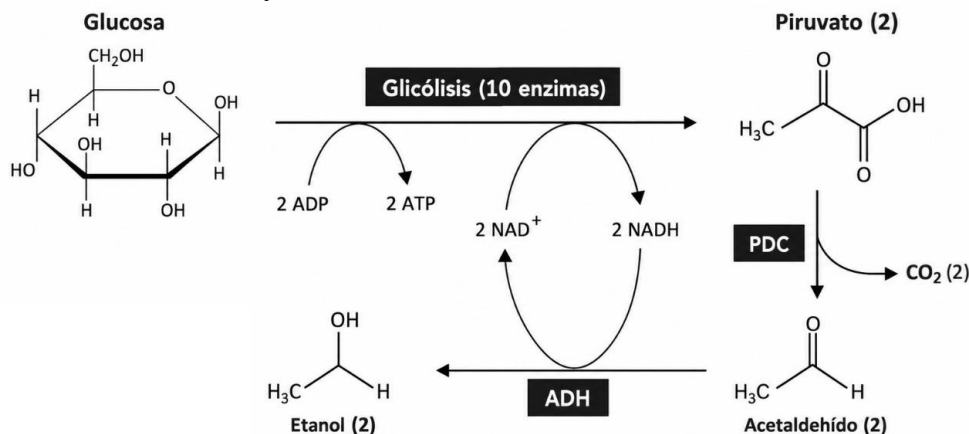


Fermentación Alcohólica

La fermentación alcohólica es un proceso anaeróbico que incluye tres etapas principales: glucólisis, descarboxilación del piruvato y reducción del acetaldehído a etanol. En este proceso, la glucosa se transforma en piruvato, el cual posteriormente se convierte en acetaldehído y dióxido de carbono, y finalmente en etanol mediante la acción enzimática (Cuamatzi Tapia, 2019). En la figura 3 se describe el proceso metabólico de la levadura.

Figura 3

Ruta metabólica de la fermentación



Cerveza Tipo Lager y Defectos Sensoriales

Las cervezas lager se caracterizan por fermentarse a bajas temperaturas utilizando *Saccharomyces pastorianus*, lo que da lugar a perfiles de sabor más limpios y suaves. No obstante, durante su elaboración pueden presentarse defectos sensoriales (“off-flavors”) como el dimetil sulfuro (DMS), diacetilo, acetaldehído, oxidación, astringencia, compuestos sulfurosos y fenoles, los cuales afectan la calidad final del producto.

En la tabla 1 se describen los principales off flavors de la cerveza con su principal causa y su prevención.

Tabla 1*Off flavors en cerveza lager*

Nombre	Aroma	Causas	Prevención
Dimetil Sulfuro (DMS)	Sabor y aroma a maíz cocido o vegetales hervidos	Insuficiente hervor, enfriamiento inadecuado del mosto o uso excesivo de maltas pálidas ricas en precursores de DMS	Hervir el mosto durante al menos 60 minutos y enfriarlo rápidamente
Diacetilo	Sabor y aroma a mantequilla o caramelo	Fermentación incompleta, levaduras estresadas o falta de descanso de diacetilo al final de la fermentación	Asegurarse de que la fermentación sea completa y mantener la temperatura adecuada durante la fermentación, además de permitir un descanso de diacetilo al final del proceso de fermentación
Acetaldehído	Sabor a manzana verde o sidra	Fermentación incompleta, levadura estresada o insuficiente tiempo de maduración	Asegurarse de que la fermentación y maduración sea completa
Oxidación	Sabor a papel mojado, cartón o vino rancio	Exposición al oxígeno durante el embotellamiento o envasado, almacenamiento prolongado en condiciones no óptimas	Minimizar la exposición al oxígeno en todas las etapas del proceso de elaboración
Astringencia	Sabor amargo y seco, similar a chupar una bolsita de té	Extracción excesiva de taninos de la cáscara de la malta, altas temperaturas de maceración o pH elevado	Controlar la temperatura y el pH durante la maceración y evitar la molienda excesiva de la malta
Sulfuros	Olores a huevo podrido o cerillas quemadas	Fermentación incompleta, levaduras estresadas o insuficiente ventilación del mosto	Asegurar una fermentación completa y adecuada aireación del mosto antes de la fermentación
Fenoles	Sabores y aromas a clavo de olor, medicinas o humo	Contaminación bacteriana o uso de levaduras inapropiadas	Mantener una buena higiene en todas las etapas del proceso de elaboración y utilizar las cepas de levadura adecuadas para la cerveza lager

Diacetilo

Entre los *off-flavors* presentes en la cerveza se encuentra el diacetilo, un compuesto orgánico volátil caracterizado por un aroma y sabor similar a mantequilla o palomitas de maíz. En el contexto de la elaboración de cerveza, el diacetilo es considerado un subproducto indeseado de la fermentación, ya que puede afectar negativamente la calidad sensorial del producto final. Las levaduras cerveceras desempeñan un papel fundamental tanto en la formación como en la posterior reducción del diacetilo durante la fermentación. Las especies más utilizadas en la producción de cerveza son *Saccharomyces cerevisiae* (levaduras tipo ale) y *Saccharomyces pastorianus* (levaduras tipo lager), microorganismos responsables de la fermentación alcohólica, en la cual los azúcares fermentables del mosto se transforman principalmente en etanol y dióxido de carbono. Además de estos productos principales, las levaduras generan diversos compuestos secundarios durante su metabolismo, entre ellos el diacetilo, que se forma como intermediario en la biosíntesis de aminoácidos como valina y leucina, y posteriormente puede ser reducido por la levadura a compuestos con menor impacto sensorial, como acetoina y 2,3-butanodiol (Briggs et al., 2004).

La relación entre la cepa de levadura utilizada y la reducción de diacetilo en la cerveza es un aspecto crucial en el proceso de elaboración. El diacetilo se forma durante la fermentación como un subproducto intermedio en la biosíntesis de aminoácidos de cadena ramificada, particularmente valina, a partir del precursor α -acetolactato producido por las levaduras. Diferentes cepas de levadura presentan variaciones en su capacidad para producir y posteriormente reducir el diacetilo, lo que influye directamente en la concentración final presente en la cerveza terminada. Algunas cepas de levadura, especialmente ciertas cepas tipo ale, pueden generar mayores concentraciones de diacetilo durante la fermentación, por lo que requieren un

control más cuidadoso del proceso para asegurar su reducción a niveles sensorialmente aceptables. Por otro lado, las cepas tipo lager, generalmente asociadas a *Saccharomyces pastorianus*, tienden a producir menores niveles de diacetilo; sin embargo, aún requieren condiciones adecuadas de fermentación y maduración para permitir la reducción completa de este compuesto. La capacidad de una cepa para disminuir el diacetilo depende de su habilidad para reabsorber este compuesto y metabolizarlo posteriormente en compuestos con menor impacto sensorial, como acetoina y 2,3-butanodiol, durante las etapas finales de fermentación y maduración.

El diacetilo se forma como un subproducto del metabolismo de los aminoácidos, específicamente a partir de la ruta de biosíntesis del aminoácido valina. Durante la fermentación, las levaduras excretan alfa-acetolactato, que es un precursor del diacetilo. El alfa-acetolactato se oxida químicamente en el mosto para formar diacetilo. Los principales factores que afectan la producción de diacetilo son:

- **Temperatura de Fermentación:** La temperatura tiene un impacto significativo en la actividad de la levadura y en la velocidad de conversión del alfa-acetolactato a diacetilo. Temperaturas más altas aceleran esta conversión, pero también pueden aumentar la producción de diacetilo.
- **Cepas de Levadura:** Diferentes cepas de levadura tienen diferentes capacidades para producir y reducir diacetilo. Algunas cepas generan más alfa-acetolactato y, por ende, más diacetilo, mientras que otras son más eficientes en la reducción del diacetilo a niveles indetectables.

- Oxigenación: El oxígeno en el mosto durante la fermentación primaria puede aumentar la producción de diacetilo. La correcta gestión del oxígeno es esencial para minimizar este efecto.
- Tiempo de Fermentación y Acondicionamiento: La duración de la fermentación y el acondicionamiento también influyen en los niveles de diacetilo. Un tiempo insuficiente puede resultar en niveles elevados de diacetilo, ya que la levadura necesita tiempo para reducir el diacetilo a 2,3-butanodiol, un compuesto menos volátil y sin sabor.

Después de la formación de diacetilo, las levaduras lo absorben nuevamente y lo reducen a 2,3-butanodiol, que no contribuye a sabores indeseables. Este proceso es crucial para asegurar la calidad sensorial de la cerveza. La práctica de aumentar la temperatura al final de la fermentación primaria, conocida como "descanso de diacetilo", ayuda a acelerar esta reducción.

Niveles elevados de diacetilo pueden llevar a defectos sensoriales que son percibidos negativamente por los consumidores. En muchos estilos de cerveza, el diacetilo es considerado un defecto, aunque en algunos estilos tradicionales, como las ales inglesas, niveles muy bajos de diacetilo pueden ser aceptables o incluso deseados. Por ende, el control del diacetilo es una parte esencial del proceso de elaboración de cerveza que requiere una comprensión detallada del metabolismo de la levadura y de las condiciones de fermentación. Mediante el uso de cepas adecuadas, el control preciso de la temperatura y la gestión adecuada del tiempo de fermentación y acondicionamiento, los cerveceros pueden minimizar la presencia de diacetilo y mejorar la calidad de sus productos.

La selección de la cepa de levadura debe basarse en el estilo de cerveza que se está elaborando y en las características deseadas del producto final. Conocer las propiedades

específicas de la cepa en cuanto a la producción y reducción de diacetilo permite a los cerveceros manejar el proceso de fermentación de manera que se minimicen los niveles de diacetilo en la cerveza terminada.

La formación de diacetilo en la cerveza está asociada al metabolismo de los aminoácidos de cadena ramificada por parte de las levaduras durante la fermentación. Específicamente, el diacetilo se origina a partir del α -acetolactato, un intermediario generado durante la biosíntesis de valina en las células de levadura. Una fracción del α -acetolactato producido intracelularmente puede difundirse hacia el medio extracelular, donde se oxida de manera no enzimática formando diacetilo. Posteriormente, este compuesto puede ser reabsorbido por la levadura y reducido mediante reacciones enzimáticas a acetoina y finalmente a 2,3-butanodiol, compuestos que presentan un impacto sensorial mucho menor en la cerveza. La eficiencia de este proceso depende de factores como la cepa de levadura utilizada, la temperatura de fermentación, la disponibilidad de nutrientes y el tiempo de maduración, los cuales influyen directamente en la velocidad de formación y reducción del diacetilo durante la fermentación y el acondicionamiento de la cerveza (Bitew & Andualem, 2024).

Factores que Influyen en la Formación y Reducción de Diacetilo

La formación y posterior reducción del diacetilo durante la fermentación cervecera está influenciada por diversos factores relacionados con las condiciones del proceso y las características fisiológicas de la levadura. Entre los factores más importantes se encuentran la cepa de levadura utilizada, la temperatura de fermentación, la disponibilidad de oxígeno durante la propagación de la levadura y la concentración de aminoácidos en el mosto. La temperatura tiene un efecto significativo, ya que temperaturas más altas favorecen la actividad metabólica de la levadura y aceleran la reducción del diacetilo a compuestos menos activos sensorialmente

como acetoina y 2,3-butanodiol. Asimismo, una adecuada disponibilidad de nutrientes y un correcto estado fisiológico de la levadura pueden mejorar la capacidad de reabsorción del diacetilo. Por el contrario, fermentaciones con levaduras estresadas o con baja viabilidad pueden provocar una acumulación de este compuesto, afectando negativamente el perfil sensorial de la cerveza.

Condiciones inadecuadas pueden generar acumulación de diacetilo, mientras que condiciones óptimas favorecen su reducción.

Descanso de Diacetilo

El descanso de diacetilo es una práctica común en cervezas lager que consiste en aumentar ligeramente la temperatura al final de la fermentación, con el fin de estimular la actividad de la levadura y favorecer la reducción del diacetilo. Este proceso suele durar entre 24 y 72 horas y es fundamental para garantizar que los niveles del compuesto se encuentren por debajo del umbral sensorial antes de la maduración (Bitew & Anduaem, 2024).

Metodología

Conteo Celular

El conteo celular de las levaduras se realizó mediante la técnica de cámara de Neubauer. Para ello, se tomó una muestra de 2,5 mL de suspensión de levadura en un matraz Erlenmeyer de 25 mL y se llevó a volumen con agua destilada hasta completar 25 mL, obteniendo así la dilución correspondiente.

La cámara de Neubauer se limpió y secó previamente a su uso, asegurando condiciones óptimas de observación. Posteriormente, se colocó la lámina de cuarzo sobre el área de conteo, verificando su correcta alineación. Con ayuda de una pipeta Pasteur estéril, se tomó la muestra diluida, descartando las primeras gotas, y se permitió el ingreso de la suspensión por capilaridad entre la lámina y la cámara, evitando el sobrellenado.

El conteo se realizó en el área de 1 mm², considerando las células presentes en los cinco cuadros centrales de la cámara (Brewing & Quality Director, 2023).

El cálculo de la concentración celular se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Conteo celular } \frac{\text{células}}{\text{mL}} = T \times 5 \times D \times 10^4$$

Donde:

- T = número de células contadas en los cinco cuadros,
- 5 = factor de conversión a los 25 cuadros,
- D = factor de dilución (10 o 100),
- 10⁴ = factor de conversión a mililitros.

Determinación de la Viabilidad Celular

La viabilidad celular se determinó mediante tinción con azul de metileno, basada en la permeabilidad de la membrana plasmática. Las células viables, con membranas intactas, impiden

la entrada del colorante y lo reducen a su forma incolora gracias a compuestos como el NADH. Por el contrario, las células no viables permiten la entrada del colorante y se tiñen de azul.

Para el análisis, se transfirió 1 mL de muestra a un tubo de ensayo con 9 mL de solución salina y se homogeneizó. Posteriormente, se tomaron dos gotas de la suspensión y se mezclaron con dos gotas de azul de metileno. La mezcla se dejó reposar durante un minuto, tras lo cual se colocó una alícuota en un portaobjetos y se dejó sedimentar por tres minutos.

La observación se realizó en microscopio óptico con objetivo de 40X. Se contaron entre 200 y 300 células, diferenciando entre células vivas (incoloras) y células muertas (azules), excluyendo brotes o células de tamaño inferior (Brewing & Quality Director, 2023).

La viabilidad se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\text{Viabilidad (\%)} = \left(\frac{\text{Número de células vivas}}{\text{Número de células contadas}} \right) \times 100$$

Fase de Laboratorio: Propagación de Levadura

El proceso de propagación se realizó con el objetivo de obtener biomasa suficiente de la nueva cepa de levadura para su posterior uso en fermentación y reutilización en múltiples ciclos. Se trabajó con una cepa comercial utilizada en la empresa y una nueva cepa lager en evaluación.

La propagación se desarrolló en dos etapas: laboratorio y planta, con incrementos progresivos de volumen en función del crecimiento celular y los resultados de conteo y viabilidad.

- Etapa 1: se utilizó mosto estéril a 16 °Plato, previamente atemperado a 22 °C. Se inoculó el contenido de un cultivo en slant en un matraz Erlenmeyer de 1000 mL con 400 mL de mosto. La incubación se realizó a 20 °C durante 24 horas con agitación orbital a 80 rpm.

- Etapa 2: el cultivo obtenido se transfirió a un matraz Erlenmeyer de 5000 mL con 2000 mL de mosto estéril. Se incubó bajo las mismas condiciones de agitación y temperatura durante 24 horas.
- Etapa 3: se inocularon tres recipientes tipo Carlsberg con 19 Litros de mosto estéril a 16 °Plato, adicionando 700 mL de cultivo por recipiente. La incubación se realizó a 20 °C durante 24 horas, con aireación intermitente (5 minutos de aire estéril y 10 minutos de reposo) a un flujo de 1,5 scfh.

Escalado en Planta y Fermentación

Una vez alcanzada una concentración de 120 millones de células/mL, se procedió al escalado en planta en un tanque propagador de 600 hL, bajo condiciones controladas de esterilidad, aireación, temperatura y limpieza Cleaning in Place (CIP).

El proceso se desarrolló en cuatro fases:

- Fase 19 hL: inoculación inicial con aireación constante a 18 °C hasta alcanzar 100–120 millones células/mL.
- Fase 48 hL: incremento de volumen y reducción de temperatura a 16 °C, con monitoreo cada 8 horas.
- Fase 648 hL: aumento de volumen y reducción de temperatura a 14 °C, manteniendo aireación constante.
- Fase de fermentación (FV): control de temperatura, pH, oxigenación y reducción de diacetilo.

En todas las fases se evaluó la viabilidad celular, estableciendo un valor mínimo aceptable del 99 %.

Determinación de Diacetilo

El seguimiento del diacetilo se realizó diariamente durante la fermentación hasta la fase de descanso de diacetilo. Se estableció una temperatura de 15,5 °C para esta etapa, con el objetivo de alcanzar concentraciones inferiores a 100 ppb.

La cuantificación de diacetilo y dicetonas vecinales (VDK) se realizó mediante cromatografía de gases, utilizando un equipo Shimadzu GC-2030 con detector de captura de electrones y columna capilar ZB-5. Se empleó la técnica de headspace estático, equilibrando las muestras a 35 °C. Para determinar el contenido total de precursores, las muestras se sometieron a aireación y calentamiento a 60 °C, permitiendo la conversión de α -acetolactato a diacetilo.

La cuantificación se realizó utilizando hexanodiona como estándar interno, expresando los resultados en partes por billón (ppb)(Brewing & Quality Director, 2023).

Análisis de la Evolución del Diacetilo

Se construyeron curvas de concentración de diacetilo en función del tiempo para evaluar su comportamiento durante la fermentación. Inicialmente, se observa un aumento debido a la formación de α -acetolactato, seguido de una disminución asociada a la reabsorción y reducción del diacetilo por la levadura.

Este proceso se ve favorecido durante el descanso de diacetilo, donde el incremento de temperatura estimula la actividad metabólica de la levadura. El criterio de control establecido fue alcanzar concentraciones inferiores a 100 ppb en un tiempo máximo de nueve días.

Proceso de Fermentación

El proceso de fermentación se divide en cuatro fases. En la tabla 2 se describen las condiciones operativas actuales empleadas con la levadura estándar del proceso, en términos de temperatura, extracto y tiempo.

Tabla 2*Parámetros del proceso de fermentación*

Fases	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
Parámetros				
Temperatura en grados Celsius	12.5±1	12.5± a 15.5±1	15.5±1	15.5±1 a 5
Porcentaje de sólidos solubles	16 a 7.5	7.5 a 5	5 a 3.4	3.4 a 3.1
Tiempo en horas	72±12	24±12	60±12	48±12

Durante el proceso, la levadura es retirada del tanque al alcanzar el punto cero de fermentación y posteriormente almacenada en tanques dosificadores para su reutilización. La fermentación se considera finalizada en la fase 3, cuando el extracto alcanza aproximadamente 3,4 °Plato y la concentración de diacetilo es inferior a 130 ppb.

Posteriormente, el proceso continúa con la fase 4 o enfriamiento, en la cual la temperatura se reduce hasta 5 °C. En esta etapa, el extracto aparente disminuye ligeramente debido a la presencia de levadura residual que aún no ha floculado. Finalmente, la cerveza verde es trasegada a tanques de maduración a temperaturas entre -1 y -2 °C, donde ocurre la sedimentación de compuestos proteicos y restos de levadura, así como el refinamiento del perfil sensorial mediante la eliminación de compuestos volátiles indeseables, como compuestos azufrados y diacetilo.

Determinación de Diacetilo en Producto Terminado

Se realizó la determinación de diacetilo en el producto terminado con el fin de evaluar posibles efectos derivados del cambio de cepa de levadura. Este parámetro es crítico, ya que influye directamente en el perfil sensorial de la cerveza y puede generar rechazo por parte del consumidor.

Se estableció como criterio de aceptación una concentración inferior a 40 ppb, valor por debajo del umbral de para consumidores entrenados (Kunze & Manger, 2014).

Análisis Físicoquímicos del Producto Terminado

Con el objetivo de verificar el cumplimiento de las especificaciones de calidad para la liberación comercial del producto, se realizaron análisis físicoquímicos en el producto terminado. Los parámetros evaluados incluyeron contenido de alcohol, extracto, pH y turbidez.

Contenido de Alcohol

El contenido de alcohol se determinó mediante medición de densidad utilizando un Alcolyzer anton paar DMA 4500 analizador específico para bebidas fermentadas, el cual permite calcular el porcentaje de alcohol en volumen (% v/v) a partir de la diferencia entre el extracto original y el extracto final.

Extracto

El extracto aparente o real se determinó mediante medición de densidad utilizando densímetros o analizadores digitales. Este parámetro representa la cantidad de sustancias disueltas en la cerveza, principalmente azúcares residuales y compuestos derivados de la malta, y permite evaluar el grado de fermentación alcanzado.

pH

El pH se determinó utilizando un pH-metro previamente calibrado con soluciones buffer estándar. Este parámetro permite evaluar el nivel de acidez del producto final, el cual influye en la estabilidad microbiológica, el perfil sensorial y la vida útil de la cerveza.

Turbidez

La turbidez se determinó mediante un turbidímetro, el cual mide la dispersión de la luz causada por partículas en suspensión en la cerveza. Este parámetro se expresa en unidades nefelométricas de turbidez (NTU) y permite evaluar la claridad del producto final.

Los resultados obtenidos fueron comparados con los parámetros de calidad establecidos por la marca, con el fin de verificar el cumplimiento de las especificaciones requeridas para su liberación comercial.

Toma de Muestras

La toma de muestras se realizó garantizando la trazabilidad del proceso, desde el tanque de fermentación, pasando por el tanque de maduración, el ciclo de filtración y el tanque de cerveza brillante previo al envasado.

Adicionalmente, se tomaron muestras del producto final después del proceso de etiquetado, las cuales fueron trasladadas al laboratorio para su respectivo análisis fisicoquímico y sensorial. En la tabla 3 se describen los resultados de los análisis obtenidos en el producto terminado.

Tabla 3

Resultados físicoquímicos del producto terminado

Marca	Extracto (9.80±0.5)	Alcohol (4.00±0.5)	pH (4.00±0.5)	Turbidez (0.7±0.1)
Pilsen	9.81	4.03	4.00	0.74
	9.79	4.02	4.01	0.72
	9.81	4.04	4.05	0.69
	9.80	3.99	4.04	0.74
	9.76	4.02	4.02	0.78
	9.81	4.01	4.03	0.76
	9.83	4.03	4.00	0.68
	9.78	4.04	3.96	0.66
	9.85	4.00	4.01	0.74
	9.76	3.96	4.02	0.71

Marca	Extracto (9.80±0.5)	Alcohol (4.00±0.5)	pH (4.00±0.5)	Turbidez (0.7±0.1)
Club Colombia	9.84	3.98	4.03	0.74
	9.78	4.00	4.01	0.75
	9.82	4.02	4.04	0.74
	9.84	3.97	4.02	0.79
	9.76	3.99	3.98	0.68
	9.81	4.02	4.02	0.71
	9.76	3.98	4.01	0.73
	9.74	4.01	3.99	0.68
	9.75	4.03	4.00	0.69
Light	9.76	4.01	4.00	0.72
	9.75	4.03	3.99	0.78
	9.78	4.04	3.98	0.76
	9.77	4.08	4.01	0.69
	9.78	4.05	4.00	0.74
	9.76	4.03	3.99	0.72
	9.75	4.02	3.96	0.69
	9.79	4.01	3.98	0.68
	9.81	4.02	4.01	0.68
Póker	9.81	4.03	4.01	0.71
	9.84	3.98	4.02	0.68
	9.82	4.04	3.99	0.71
	9.80	4.02	4.05	0.75
	9.81	4.03	4.02	0.68
	9.82	4.00	4.04	0.69
	9.83	4.01	4.03	0.74
	9.78	4.00	4.04	0.72
	9.77	3.99	4.02	0.71
	9.84	3.98	3.98	0.74

Análisis de Resultados y Discusión

Análisis de Conteo y Viabilidad de Levadura en la Propagación

Los resultados obtenidos en las tres propagaciones evidencian que se alcanzaron los conteos celulares requeridos en todas las fases del proceso, tanto en laboratorio como en planta, manteniéndose una viabilidad del 100 % en todos los casos. Este comportamiento indica la ausencia de células muertas y confirma que las condiciones operativas implementadas favorecieron el crecimiento y la estabilidad fisiológica de la levadura. En las siguientes tablas se puede apreciar los procesos de propagación de la actual levadura y de la nueva cepa con sus respectivos conteos y viabilidad.

Tabla 4

Propagación 2, levadura S. cerevisiae ITW

Fase	Horas	Volumen	Temperatura (°C)	Viabilidad (%)	Conteo (Mill. Cél./mL)
Fases de laboratorio					
Primera	12	15 mL	25	100	108
Segunda	25	200 mL	20	100	112
Tercera	22	18 L	20	100	119
Fases de planta					
Primera	44	19 hL	18	100	105
Segunda	22	48 hL	16	100	120
Tercera	14	648 hL	14	100	118

Tabla 5

Propagación 2, levadura S. pastorianus ITW900F

Fase	Horas	Volumen	Temperatura (°C)	Viabilidad (%)	Conteo (Mill. Cél./mL)
Fases de laboratorio					
Primera	12	15 mL	25	100	103
Segunda	25	200 mL	20	100	111
Tercera	22	18 L	20	100	115
Fases de planta					
Primera	44	19 hL	18	100	104
Segunda	22	48 hL	16	100	117
Tercera	14	648 hL	14	100	116

Tabla 6*Propagación 3*

Fase	Horas	Volumen	Temperatura (°C)	Viabilidad (%)	Conteo (Mill. Cél./mL)
Fases de laboratorio					
Primera	12	15 mL	25	100	109
Segunda	25	200 mL	20	100	110
Tercera	22	18 L	20	100	119
Fases de planta					
Primera	44	19 hL	18	100	105
Segunda	22	600 hL	16	100	114
Tercera	14	6000 hL	14	100	118

Al analizar los resultados de las propagaciones, se evidenció que se cumplieron los conteos celulares requeridos y se obtuvo una viabilidad del 100 %, lo que indica la ausencia de levadura muerta durante el proceso tanto en la fase de laboratorio como en la fase de planta. En la fase de laboratorio, las etapas de propagación no superaron las 25 horas, mientras que en la fase de planta el proceso no excedió las 47 horas. En comparación con la cepa de levadura utilizada anteriormente, se observó una reducción aproximada de 60 horas en el tiempo total de propagación.

La disminución en el tiempo de propagación sugiere una mayor capacidad de crecimiento y adaptación de la cepa de levadura evaluada, lo que indica una mayor eficiencia metabólica y un desarrollo celular más rápido bajo las condiciones del proceso. Desde el punto de vista operativo, esta reducción del tiempo de propagación puede representar ventajas importantes para la compañía, como una mayor disponibilidad de levadura para los procesos de fermentación, optimización en el uso de equipos y reducción en los tiempos de preparación del cultivo. Asimismo, un proceso de propagación más corto puede contribuir a mejorar la eficiencia productiva de la planta, permitiendo una mayor rotación de los tanques y una mejor planificación de las operaciones de fermentación.

Interpretación de la Viabilidad y Propagación de la Levadura

La viabilidad del 100 % observada durante el proceso de propagación indica que las células de levadura presentaron un adecuado estado fisiológico y una alta capacidad metabólica. Este resultado sugiere que las condiciones de propagación, tales como la disponibilidad de nutrientes, oxigenación y temperatura, fueron apropiadas para el crecimiento celular, permitiendo obtener una biomasa saludable y activa para el inicio del proceso de fermentación.

Una alta viabilidad celular es un factor clave en la fermentación cervecera, ya que influye directamente en la eficiencia de consumo de azúcares, la producción de alcohol y la formación de compuestos secundarios. Cuando la levadura presenta altos niveles de viabilidad, la fase de adaptación al mosto es más corta y el inicio de la fermentación ocurre de manera más rápida y estable.

Impacto del Cambio de Cepa de Levadura en el Proceso

La reducción observada en el tiempo de propagación al utilizar la nueva cepa de levadura sugiere una mayor capacidad de crecimiento y adaptación a las condiciones del proceso en comparación con la cepa utilizada anteriormente. Este comportamiento puede estar asociado a diferencias fisiológicas entre cepas, tales como una mayor tasa de reproducción celular o una mejor eficiencia en la asimilación de nutrientes presentes en el medio de propagación.

Desde el punto de vista industrial, este resultado representa una ventaja operativa, ya que permite reducir el tiempo requerido para la preparación del cultivo de levadura, optimizando la disponibilidad de biomasa para los procesos de fermentación. Además, una propagación más rápida puede contribuir a mejorar la planificación de la producción y aumentar la eficiencia en la utilización de los equipos de propagación.

Relación con la Reducción de Diacetilo

El adecuado estado fisiológico de la levadura obtenido durante la propagación también puede influir positivamente en el comportamiento fermentativo y en la reducción de compuestos indeseables como el diacetilo. Una levadura con alta viabilidad y actividad metabólica tiene una mayor capacidad para reabsorber y reducir el diacetilo durante las etapas finales de fermentación, transformándolo en compuestos con menor impacto sensorial, como acetoin y 2,3-butanodiol.

Por lo tanto, el cambio de cepa de levadura no solo puede influir en la velocidad de propagación y en la eficiencia del proceso fermentativo, sino también en la capacidad de la levadura para reducir los niveles de diacetilo en la cerveza, contribuyendo así a mejorar la calidad sensorial del producto final.

Estos resultados evidencian que la nueva cepa de levadura presenta ventajas operativas y metabólicas frente a la cepa anteriormente utilizada, lo que podría contribuir a mejorar la eficiencia del proceso fermentativo y favorecer la reducción de diacetilo durante la producción de cerveza lager

Diacetilo

En las tablas 7 y 8 se muestran las mediciones de diacetilo en los procesos de fermentación con las 2 cepas de levadura. Se reportan los datos en el tiempo hasta llegar a una concentración <100 ppb (valor estándar) y la concentración final que obtuvo.

Tabla 7

Producción de diacetilo por cepa anterior

Levadura	Club Colombia	Pilsen	Estándar	Light
Día				
5	374±115	545±126	475±90	476±100
6	257±68	367±85	347±65	362±70
7	184±60	228±70	232±38	257±50
8	126±20	134±50	143±36	159±30
9	78±10	77±30	86±20	78±15

Podemos observar que, en todos los casos, los valores disminuyen con el paso de los días, lo que es típico en procesos de fermentación, donde la población de levaduras decrece a medida que se consume el sustrato (azúcares). La convergencia de los valores hacia el estándar en los días finales sugiere un buen control del proceso de fermentación. La alta desviación estándar al inicio puede indicar variabilidad en la inoculación o en las condiciones iniciales. Al final del proceso, todas las cervezas cumplen con el estándar, lo que es positivo para la calidad del producto. El proceso de fermentación muestra una tendencia adecuada, con una reducción progresiva de la variable medida (diacetilo) llegando a su objetivo de menos de 100 ppb en 9 días. Las diferencias iniciales entre los tipos de cerveza se reducen con el tiempo, y al final todas cumplen con el estándar establecido.

Diversos autores han descrito el comportamiento del diacetilo durante el proceso de fermentación cervecera y su relación con la actividad metabólica de la levadura. Según David E. Briggs y colaboradores (2004) el diacetilo es un subproducto natural de la fermentación que se forma durante la biosíntesis de aminoácidos por parte de las levaduras. Estos autores señalan que su concentración tiende a disminuir durante la fase de maduración, cuando las levaduras reabsorben este compuesto y lo reducen a sustancias con menor impacto aromático. Asimismo, indican que la reducción progresiva del diacetilo es un indicador de un proceso de fermentación adecuado y de buena calidad del producto final (Briggs et al., 2004).

En el presente trabajo se observó un comportamiento similar, evidenciándose una disminución gradual de la concentración de diacetilo a medida que avanzaba el proceso fermentativo. No obstante, mientras Briggs enfatiza principalmente el papel de factores como la temperatura de fermentación y la aireación inicial del mosto como variables críticas para la

formación y posterior reducción del diacetilo, el presente estudio se centra en la influencia de las condiciones iniciales de inoculación y en la variabilidad asociada al cambio de cepa de levadura.

En la tabla 8 podemos observar los resultados obtenidos con la nueva cepa de levadura.

Tabla 8

Producción de diacetilo por cepa nueva

Levadura	Club Colombia	Pilsen	Estándar	Light
Día				
5	425±60	415±100	394±120	398±90
6	332±50	321±80	317±90	301±80
7	247±20	230±60	220±70	221±70
8	129±10	126±20	122±30	127±40
9	62±5	69±10	70±10	70±20

En el caso de la levadura 2 se observa una disminución marcada de la concentración de diacetilo en todos los tipos de cerveza evaluados entre el día 2 y el día 6 de fermentación.

Además, la variabilidad entre mediciones tiende a disminuir con el tiempo, lo que podría indicar una estabilización progresiva del proceso fermentativo. Este comportamiento sugiere que, a medida que avanza la fermentación, la levadura incrementa su capacidad de reabsorción y reducción del diacetilo presente en el medio.

Al comparar ambas cepas, se evidencia que la levadura 2 presenta una reducción más rápida de la concentración de diacetilo y alcanza valores finales más bajos en un menor tiempo. Este comportamiento podría estar asociado a diferencias fisiológicas entre las cepas de levadura, particularmente en su eficiencia metabólica para consumir sustratos o en su capacidad de sedimentación durante las etapas finales de fermentación. No obstante, en ambos casos se observa una disminución significativa de la concentración de diacetilo a lo largo del proceso, lo cual es consistente con el comportamiento típico de este compuesto durante la fermentación cervecera.

Estos resultados coinciden con lo descrito por Chris Boulton y David Quain, quienes señalan que diferentes cepas de levadura pueden presentar velocidades distintas de reducción de diacetilo debido a variaciones en su metabolismo y en su capacidad de reabsorción de compuestos intermedios. Los autores también indican que estas diferencias no dependen únicamente de la cepa utilizada, sino que pueden estar influenciadas por factores de proceso como la temperatura de fermentación y la oxigenación inicial del mosto.

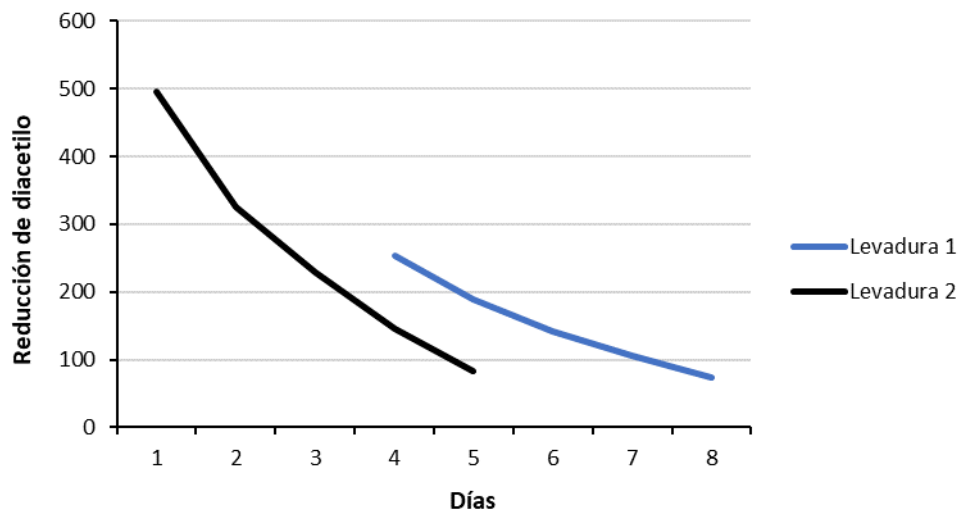
Por su parte, Wolfgang Kunze señala que distintas cepas de levadura presentan patrones diferentes de fermentación y maduración, lo que influye directamente en la velocidad de reducción del diacetilo durante la elaboración de cerveza. En este sentido, el autor destaca que alcanzar concentraciones bajas de este compuesto antes de la finalización del proceso fermentativo es un indicador positivo de calidad, lo cual coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio.

En conjunto, los resultados sugieren que la levadura 2 presenta una mayor eficiencia en la reducción de diacetilo durante la fermentación, lo que podría representar una ventaja operativa y sensorial en la producción de cervezas tipo lager, al permitir alcanzar niveles de diacetilo dentro de las especificaciones de calidad en menor tiempo.

En la Figura 4 se presenta una comparación de la cinética de reducción de diacetilo obtenida con cada una de las cepas de levadura evaluadas, así como el número de días necesarios para alcanzar la concentración objetivo establecida, inferior a 100 ppb.

Figura 4

Comportamiento del diacetilo en producción de cerveza Club Colombia

**Figura 5**

Comportamiento del diacetilo en producción de cerveza estándar

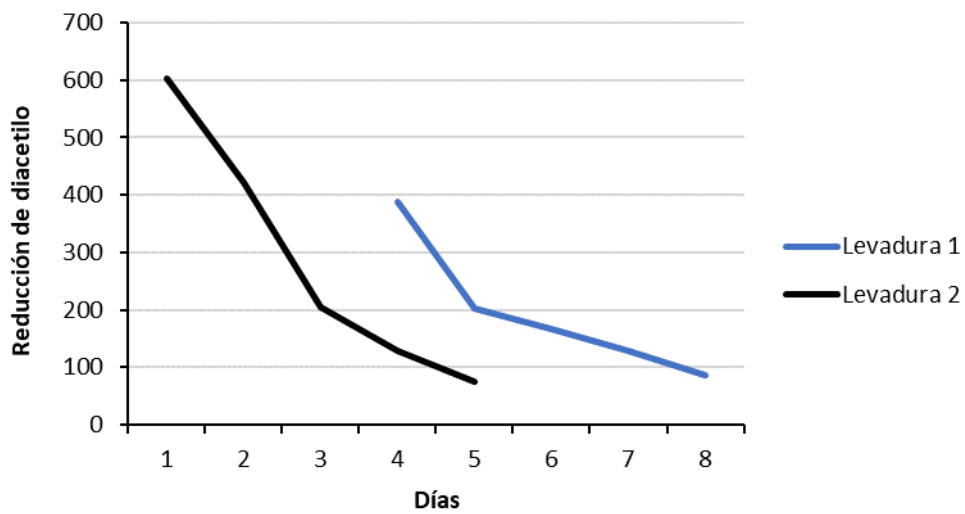
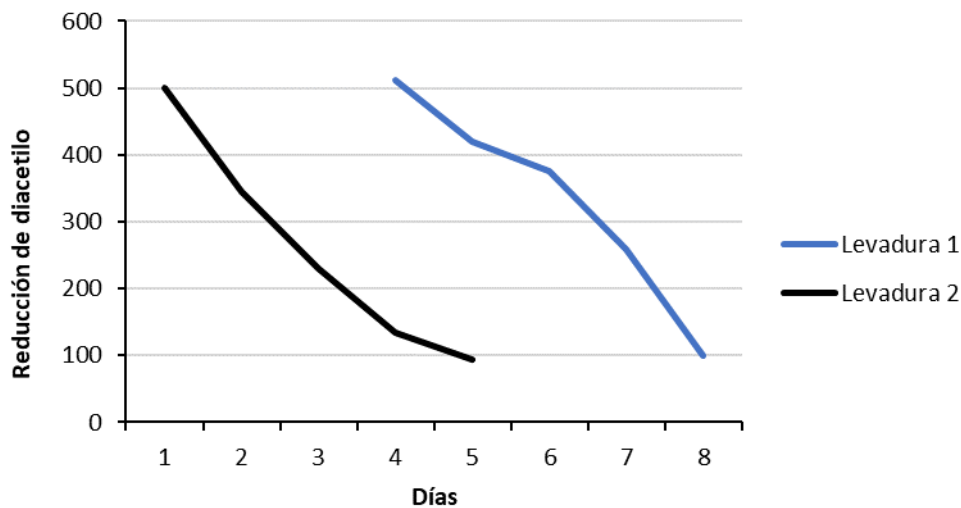
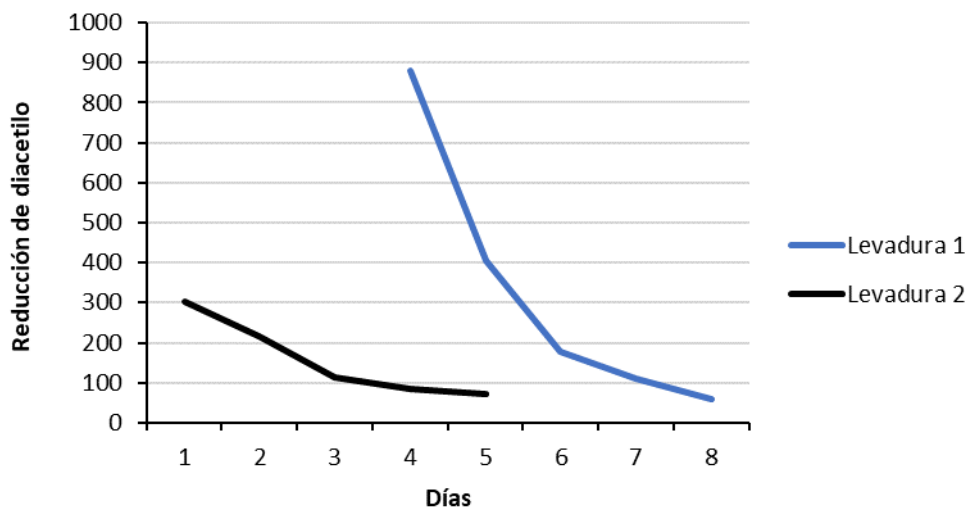


Figura 6*Comportamiento del diacetilo en producción de cerveza light***Figura 7***Comportamiento del diacetilo en producción de cerveza Pilsen*

Los resultados muestran que, al utilizar la levadura 2, este valor se alcanza aproximadamente al sexto día de fermentación. Este comportamiento sugiere que el cambio de cepa de levadura podría ser una estrategia efectiva para optimizar el proceso cervecero, ya que permitiría reducir el tiempo necesario para alcanzar los niveles aceptables de diacetilo. Desde el

punto de vista operativo, esto podría proporcionar mayor flexibilidad en la programación de la producción y contribuir a disminuir el tiempo total de fermentación.

Estos resultados coinciden con lo reportado por David E. Briggs que describe que algunas cepas de levadura presentan una mayor actividad de enzimas involucradas en la reducción del diacetilo, como la diacetyl reductase, lo que les permite alcanzar concentraciones por debajo del estándar (<100 ppb) en menor tiempo. Este comportamiento coincide con lo observado en la levadura 2 evaluada en el presente estudio. Briggs señala además que este tipo de cepas puede representar una ventaja para la eficiencia del proceso productivo, siempre que se mantenga un control adecuado de otros compuestos secundarios que también influyen en el perfil sensorial de la cerveza.

En conjunto, los resultados obtenidos sugieren que la levadura 2 presenta una mayor eficiencia en la reducción de diacetilo, lo que podría representar una alternativa viable para optimizar el proceso de fermentación en la producción de cervezas tipo lager.

La implementación de cepas con mayor capacidad de reducción de diacetilo podría contribuir a mejorar la eficiencia operativa de la planta, permitiendo optimizar los tiempos de fermentación sin comprometer la calidad del producto final.

Comparación de Eficiencia Entre Levadura 1 y Levadura 2

Con base en los resultados obtenidos durante el proceso de fermentación, se realizó una comparación entre el comportamiento de la levadura 1 (cepa anterior) y la levadura 2 (nueva cepa) en términos de velocidad de reducción de diacetilo, niveles finales alcanzados y consistencia del proceso.

Rapidez de Reducción de Diacetilo

Los resultados muestran que la levadura 2 presenta una reducción más rápida de la concentración de diacetilo en comparación con la levadura 1. En el caso de la levadura 2, el seguimiento del compuesto inicia desde el día 2 de fermentación y para el día 6 ya se alcanzan valores inferiores a 100 ppb, con concentraciones finales entre 62 y 70 ppb.

Por el contrario, la levadura 1 requiere un mayor tiempo de fermentación, iniciando el seguimiento desde el día 5 y alcanzando valores finales similares únicamente hasta el día 9, con concentraciones entre 77 y 86 ppb. Esto indica que, aunque ambas cepas son capaces de reducir el diacetilo a niveles aceptables, la levadura 2 lo hace en un menor tiempo, lo que representa una ventaja desde el punto de vista operativo.

Niveles Finales de Diacetilo

A pesar de las diferencias en la velocidad de reducción, ambas levaduras alcanzan niveles finales de diacetilo similares, inferiores al estándar de 100 ppb establecido para garantizar la calidad sensorial de las cervezas tipo lager. Este comportamiento confirma que ambas cepas poseen la capacidad metabólica necesaria para reabsorber y reducir el diacetilo durante las etapas finales de fermentación.

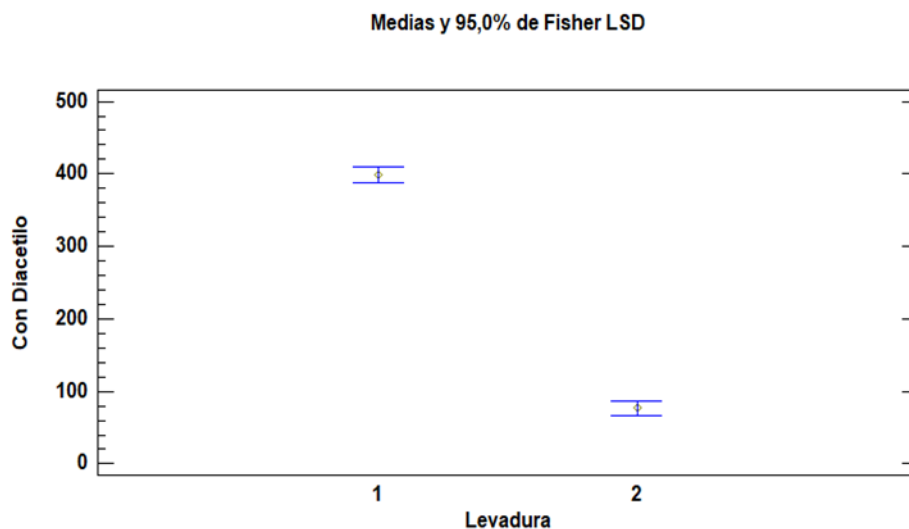
Consistencia del Proceso entre Tipos de Cerveza

Otro aspecto relevante observado en los resultados es la variabilidad entre mediciones. La levadura 2 presenta desviaciones estándar menores, lo que sugiere un proceso más consistente y predecible entre los diferentes tipos de cerveza evaluados. En contraste, la levadura 1 muestra una mayor variabilidad, especialmente en las etapas iniciales de fermentación.

En la figura 5 se describe el análisis estadístico ANOVA realizado a las dos levaduras.

Figura 8

Análisis estadístico de la reducción de diacetilo



El análisis estadístico realizado mediante ANOVA permitió evaluar la existencia de diferencias significativas entre el comportamiento de ambas cepas de levadura durante el proceso de reducción de diacetilo. Los resultados obtenidos, presentados en la Figura 5, evidencian que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las dos levaduras analizadas.

Este resultado sugiere que el cambio de cepa tiene un efecto directo sobre la cinética de reducción de diacetilo durante la fermentación. En particular, la levadura 2 demuestra una mayor eficiencia en la disminución de este compuesto, permitiendo alcanzar los niveles requeridos para la liberación del producto en un menor tiempo.

Desde el punto de vista industrial, este comportamiento representa una ventaja importante, ya que permite reducir el tiempo total de fermentación de aproximadamente nueve a seis días, manteniendo al mismo tiempo los niveles de diacetilo dentro de las especificaciones de calidad establecidas. Esta reducción en el tiempo de proceso puede traducirse en una mayor

disponibilidad de tanques de fermentación, mayor flexibilidad en la programación de la producción y una mejora en la eficiencia operativa de la planta.

Conclusiones

La evaluación del proceso de propagación permitió confirmar que se alcanzaron los conteos celulares requeridos, manteniendo una viabilidad del 100 % tanto en la fase de laboratorio como en la fase de planta. Estos resultados evidencian que las condiciones operativas implementadas fueron adecuadas para el crecimiento de la levadura, garantizando la obtención de una biomasa activa y fisiológicamente estable para el inicio del proceso de fermentación.

La comparación entre las cepas de levadura demostró que la levadura 2 presenta una mayor eficiencia en la reducción de diacetilo durante la fermentación, alcanzando concentraciones inferiores a 100 ppb en un menor tiempo en comparación con la cepa previamente utilizada, sin afectar los niveles finales requeridos para la calidad del producto.

El análisis de la cinética de reducción de diacetilo evidenció que la levadura 2 logra alcanzar el valor objetivo aproximadamente al sexto día de fermentación, lo que representa una disminución significativa en el tiempo necesario para cumplir con las especificaciones de calidad, en contraste con los nueve días requeridos por la levadura 1.

La reducción tanto en el tiempo de propagación como en la cinética de disminución de diacetilo sugiere que la levadura 2 posee características fisiológicas y metabólicas superiores, asociadas a una mayor eficiencia en su actividad fermentativa y en la reabsorción de compuestos intermedios.

Desde el punto de vista industrial, la implementación de la levadura 2 representa una alternativa viable para la optimización del proceso cervecero, ya que permite reducir los tiempos de fermentación, mejorar la disponibilidad de equipos y aumentar la eficiencia operativa, manteniendo el cumplimiento de los parámetros fisicoquímicos y sensoriales del producto final.

Recomendaciones

Se recomienda profundizar en la evaluación del desempeño de la levadura 2 bajo diferentes condiciones de fermentación, incluyendo variaciones en temperatura, niveles de oxigenación inicial y tasas de inoculación, con el fin de caracterizar de manera más completa su comportamiento cinético y metabólico en distintos escenarios operativos.

Se sugiere realizar estudios complementarios orientados a la caracterización del perfil sensorial, mediante la cuantificación de compuestos secundarios de fermentación como ésteres, alcoholes superiores y compuestos azufrados, con el propósito de determinar el impacto del cambio de cepa sobre las características organolépticas del producto final.

Se recomienda evaluar la aplicabilidad de la levadura 2 en diferentes estilos de cerveza y formulaciones de mosto, con el fin de determinar su versatilidad y potencial de implementación en otras líneas de producción dentro de la planta.

Es conveniente llevar a cabo un seguimiento a escala industrial durante múltiples ciclos de producción, que permita validar la reproducibilidad de los resultados obtenidos, especialmente en términos de reducción de diacetilo, estabilidad del proceso y consistencia del producto final.

Se recomienda analizar la optimización del tiempo de descanso de diacetilo (diacetyl rest), considerando la mayor eficiencia observada en la levadura 2, con el objetivo de reducir aún más los tiempos de fermentación sin comprometer la calidad sensorial de la cerveza.

Adicionalmente, se sugiere evaluar el impacto económico asociado a la implementación de la nueva cepa de levadura, considerando variables como reducción de tiempos de proceso, incremento en la rotación de tanques y posibles ahorros operativos, con el fin de sustentar la toma de decisiones a nivel industrial.

Referencias Bibliográficas

- Bitew, D., & Andualem, B. (2024). Diacetyl Production During Brewing and its Management Through Process Optimization and Molecular Evolution of Yeast. En A. Morata, I. Loira, C. González, & C. Escott (Eds.), *New Advances in Saccharomyces*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1003823>
- Brewing & Quality Director. (2023). *Brand Manual VPO* [Documento institucional].
- Briggs, D. E., Boulton, C. A., Brookes, P. A., & Stevens, R. (2004). *Brewing: Science and practice*. CRC Press Woodhead Pub.
- Brock, T. D. (with Madigan, M. T., Guerrero, R., & Chica, C.). (2015). *Brock Biología de los microorganismos* (C. Barrachina, Trad.; 14a edición). Pearson Education.
- Cabras, I., & Higgins, D. M. (2016). Beer, brewing, and business history. *Business History*, 58(5), 609-624. <https://doi.org/10.1080/00076791.2015.1122713>
- Carneiro, D. D., & Meleiro, L. A. D. C. (2011). Proposta de uma nova estratégia de controle para a fermentação cervejeira. *Publicatio UEPG - Ciências Exatas e da Terra, Agrárias e Engenharias*, 17(1), 17-28. <https://doi.org/10.5212/Publ.Exatas.v.17i1.0002>
- Cuamatzi Tapia, O. (with Melo Ruiz, V.). (2019). *Bioquímica de los procesos metabólicos* (3rd ed). Editorial Reverté.
- De Keukeleire, D. (2000). Fundamentals of beer and hop chemistry. *Química Nova*, 23(1), 108-112. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422000000100019>
- Jesús Callejo, M., Tesfaye, W., Carmen González, M., & Morata, A. (2020). Craft Beers: Current Situation and Future Trends. En R. María Martínez-Espinosa (Ed.), *New Advances on Fermentation Processes*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90006>

- Kunze, W., & Manger, H.-J. (2014). *Technology brewing & malting* (S. Pratt, Trad.; 5th revised English Edition). VLB.
- Master Brewers Association of the Americas. (s. f.). *Brewing & Malting Course*. Recuperado 20 de junio de 2026, de <https://www.mbaa.com/brewing-malting-course>
- Minnaar, P. P., Du Plessis, H. W., Jolly, N. P., Van Der Rijst, M., & Du Toit, M. (2019). Non-Saccharomyces yeast and lactic acid bacteria in Co-inoculated fermentations with two Saccharomyces cerevisiae yeast strains: A strategy to improve the phenolic content of Syrah wine. *Food Chemistry: X*, 4, 100070. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2019.100070>
- Moolemane, R., Rashmi, H. M., Surekha, M., & Krishna, S. B. N. (2025). In situ synthesis and AC conductivity studies of polypyrrole–cobalt nanocomposites. *Academia Materials Science*, 2(1). <https://doi.org/10.20935/AcadMatSci7554>
- Sannino, C., Mezzasoma, A., Buzzini, P., & Turchetti, B. (2019). Non-conventional Yeasts for Producing Alternative Beers. En A. Sibirny (Ed.), *Non-conventional Yeasts: From Basic Research to Application* (pp. 361-388). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21110-3_11
- Steiner, E., Becker, T., & Gastl, M. (2010). Turbidity and Haze Formation in Beer—Insights and Overview. *Journal of the Institute of Brewing*, 116(4), 360-368. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2010.tb00787.x>
- Štěrba, K., Čejka, P., Čulík, J., Jurková, M., Krofta, K., Pavlovič, M., Mikyška, A., & Olšovská, J. (2015). Determination of linalool in different hop varieties using a new method based on fluidized-bed extraction with gas chromatographic-mass spectrometric detection. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 73(2), 151-158. <https://doi.org/10.1094/ASBCJ-2015-0406-01>

Strong, G., & England, K. (2022). *Guía de estilos 2021: Guía de estilos de cerveza*. Beer Judge Certification Program. https://www.bjcp.org/wp-content/uploads/2024/03/2021_Guidelines_Beer_ES_1.0.pdf