

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



**“Desarrollo y aplicación de levadura reutilizada en la industria cervecera, evaluando
eficiencia y reducción de costos operativos “**

POR

BR. HÉCTOR BENJAMÍN HENRÍQUEZ MÁRQUEZ

REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO DE 2026

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

M. Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

DECANO

M. Sc. NELSON BERNABÉ GRANADOS ALVARADO

SECRETARIO

M. Sc. EDGAR GEOVANY REYES MELARA

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

M. Sc. HUMBERTO RUÍZ MEJIA

ASESOR INTERNO

INGA. HAYDEE ESMERALDA MUNGUÍA DE PÉREZ

ASESOR EXTERNO

ING. BERNARDO FRANCISCO SEQUEIRA DELGADO

COORDINADOR GENERAL DE PROCESOS DE GRADUACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE

INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

ING. HAYDEE ESMERALDA MUNGUÍA DE PÉREZ

RESUMEN

La presente pasantía de práctica profesional se desarrolló en Cadejo Brewing Company, ubicada en San Salvador, El Salvador, durante el período comprendido entre septiembre de 2025 y febrero de 2026. El objetivo principal fue evaluar el desempeño fermentativo y la viabilidad de la levadura en procesos de reutilización durante la producción de cerveza tipo American Pale Ale (APA).

La metodología consistió en el monitoreo diario de variables fisicoquímicas durante la fermentación y post-fermentación, incluyendo °Brix (°Plato), gravedad específica (SG), temperatura y pH. Asimismo, se realizaron conteos celulares mediante microscopía para determinar la concentración y viabilidad de la levadura en cada generación evaluada (lote inicial, R1, R2 y R3). Con base en estos datos, se calcularon parámetros como atenuación aparente, contenido alcohólico y volumen de inoculación.

Los resultados evidenciaron una disminución progresiva en la viabilidad celular (97.55 % a 91.45 %) y en la concentración celular conforme aumentaron las reutilizaciones, lo que afectó la evolución de la fermentación, observándose un proceso más lento en la tercera reutilización. No obstante, esta se mantuvo dentro de parámetros aceptables.

Se concluye que la reutilización de levadura es viable hasta tres generaciones bajo un adecuado control técnico, permitiendo optimizar costos sin comprometer la calidad del producto final.

GLOSARIO

ABV (Alcohol by Volume): porcentaje de alcohol etílico presente en una bebida alcohólica respecto al volumen total de la bebida.

Ale: tipo de cerveza fermentada con levaduras de fermentación alta, generalmente a temperaturas entre 18 y 22 °C.

American Pale Ale (APA): estilo de cerveza caracterizado por presentar perfil lupulado, color dorado a ámbar claro y fermentación limpia.

Atenuación aparente: porcentaje de azúcares fermentables consumidos por la levadura durante la fermentación.

Baja atenuación: condición en la que la levadura consume una menor cantidad de azúcares fermentables, dejando mayor cantidad de azúcares residuales en la cerveza.

BBT (Bright Beer Tank): tanque utilizado para almacenamiento, carbonatación y acondicionamiento final de la cerveza antes del envasado.

BJCP (Beer Judge Certification Program): organismo internacional que establece guías y parámetros para estilos cerveceros.

Brewpubs: establecimientos que combinan la producción de cerveza artesanal con servicio de restaurante o bar.

Carbonatación: incorporación de dióxido de carbono (CO₂) en la cerveza.

Conteo celular: procedimiento utilizado para determinar la concentración de células presentes en una muestra.

Dry hopping: técnica cervecera que consiste en agregar lúpulo durante o después de la fermentación para incrementar aroma y sabor sin aportar amargor significativo.

FG (Final Gravity): densidad final de la cerveza después de la fermentación.

Fermentación: proceso metabólico mediante el cual la levadura transforma azúcares en alcohol y dióxido de carbono.

Floculación: capacidad de las células de levadura para agruparse y sedimentar al finalizar la fermentación.

Grados Plato (°P): unidad utilizada para medir la concentración de azúcares presentes en el mosto.

Hard Seltzer: bebida alcohólica carbonatada de bajo contenido alcohólico, generalmente saborizada con frutas.

IBU (International Bitterness Units): unidad utilizada para medir el nivel de amargor de una cerveza.

Kettle: recipiente utilizado para realizar el hervor del mosto durante la elaboración de cerveza.

Krausen: capa de espuma formada durante la fase activa de fermentación.

Lager: tipo de cerveza fermentada con levaduras de fermentación baja y temperaturas más frías.

Mosto: líquido azucarado obtenido después de la maceración y previo a la fermentación.

OG (Original Gravity): densidad original del mosto antes de la fermentación.

Pitch rate (tasa de inoculación): cantidad de células de levadura inoculadas por mililitro de mosto y por grado Plato, utilizada para asegurar una fermentación adecuada. Los valores recomendados varían según el tipo de cerveza; para cervezas Ale generalmente se utiliza 1×10^6 células/mL/°P (White & Zainasheff, 2010).

pH: medida de acidez o alcalinidad de una solución.

Repitching: reutilización de levadura proveniente de una fermentación anterior para inocular un nuevo lote.

SG (Specific Gravity): gravedad específica utilizada para medir la densidad relativa del mosto o cerveza respecto al agua.

Slurry: suspensión semilíquida compuesta principalmente por levadura recuperada después de la fermentación.

SRM (Standard Reference Method): escala utilizada para medir el color de la cerveza.

US-05: cepa comercial de levadura tipo American Ale producida por Fermentis.

Viabilidad celular: porcentaje de células vivas presentes en una población de levadura.

Whirlpool: etapa posterior al hervor utilizada para separar sólidos del mosto mediante movimiento circular.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	Objetivo general	2
2.2	Objetivos específicos	2
3	INFORMACIÓN DE LA UNIDAD PRODUCTIVA.....	3
3.1	Datos generales	3
3.1.1	Localización.....	3
3.1.2	Antecedentes.....	3
3.2	Recursos.....	4
3.2.1	Recursos naturales e industriales.....	4
3.2.2	Recursos físicos.....	4
3.2.3	Recursos humanos.....	4
3.3	Actividades actuales	5
3.3.1	Producción principal	5
3.3.2	Situación técnica.....	5
3.3.3	Situación administrativa	5
3.3.4	Comercialización.....	6
4	ANÁLISIS DE PROBLEMÁTICAS.....	7
4.1	Disminución de viabilidad en generaciones sucesivas	7
4.1.1	Problema identificado	7
4.1.2	Acción implementada.....	7
4.1.3	Impacto generado	7
4.2	Impacto económico del uso de levadura fresca.....	8
4.2.1	Problema identificado	8
4.2.2	Acción implementada.....	8
4.2.3	Impacto generado	8
5	MARCO TEORICO	9
5.1	Antecedentes.....	9

5.1.1	Fermentación espontánea y domesticación temprana de levaduras.....	9
5.1.2	Elaboración empírica y aportes monásticos en la Edad Media.....	10
5.1.3	Descubrimiento de la levadura como microorganismo	10
5.1.4	Desarrollo de cultivos puros y avances científicos del siglo XIX.....	10
5.1.5	Historia y desarrollo de la cerveza	11
5.2	Biología y clasificación de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	12
5.2.1	Clasificación y características generales.....	12
5.2.2	Crecimiento y fases de la fermentación de la levadura	13
5.2.3	Cronología y metabolismo de la fermentación	13
5.2.4	Fase de latencia	14
5.2.5	Fase exponencial	15
5.2.6	Fase estacionaria	15
5.3	Vitalidad y viabilidad celular en la fermentación cervecera	16
5.3.1	Factores que influyen en la vitalidad y viabilidad celular	16
5.3.2	Relevancia de la viabilidad celular.....	16
5.3.3	Viabilidad y vitalidad de levaduras reutilizadas	16
5.3	Conteo celular y control del cultivo.....	16
5.3.1	Importancia del conteo celular	17
5.3.2	Factores que afectan el conteo celular	17
5.3.3	Métodos de estimación de concentración celular	17
5.4	Conservación y reutilización de levaduras	17
5.4.1	Prácticas adecuadas para la conservación y reutilización.....	17
5.5	Tasas de inoculación y desempeño fermentativo	18
5.5.1	Tasas de inoculación (Pitching Rates).....	18
5.5.2	Consecuencias de la sobre inoculación y sub-inoculación.....	18
5.3.4	Factores que influyen en la fermentación.....	18
5.3.5	Influencia en el perfil sensorial de la cerveza.....	19
5.3.6	Concepto y justificación de reutilización.....	20
5.3.7	Ventajas económicas y productivas	20

5.3.8	Factores que afectan la reutilización.....	20
6	METODOLOGÍA.....	21
6.1	Diseño del proceso fermentativo y evaluación de levadura.....	21
6.1.1	Caracterización del estilo y selección de levadura.....	21
6.1.2	Características técnicas de la levadura.....	21
6.1.3	Determinación de la atenuación aparente.....	21
6.1.4	Estimación del contenido alcohólico.....	22
6.1.5	Determinación de la concentración celular	22
6.1.6	Determinación de la viabilidad celular	22
6.1.7	Cálculo del volumen de inoculación.....	23
6.2	Parámetros del estilo American Pale Ale (BJCP 18B)	23
6.3	Proceso de toma y conteo de levaduras	24
6.3.1	Preparación previa al análisis.....	24
6.3.2	Recolección de muestra desde el fermentador	24
6.3.3	Análisis en laboratorio.....	25
6.3.4	Procedimiento	25
6.3.5	Observación microscópica.....	25
6.3.6	Conteo celular.....	26
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
7.1	Lote de inicio	27
7.2	Evaluación del lote inicial	27
7.2.1	Atenuación aparente.....	27
7.2.2	Contenido alcohólico.....	28
7.2.3	Análisis comparativo con BJCP 18B.....	28
7.2.4	Concentración celular.....	28
7.2.5	Viabilidad celular	28
7.2.6	Volumen de inoculación	29
7.3	Reutilización 1 (R1).....	30
7.3.1	Comportamiento fermentativo	30

7.3.2	Concentración celular.....	31
7.3.3	Viabilidad celular	31
7.3.4	Volumen de inoculación	31
7.4	Segunda reutilización (R2).....	31
7.4.1	Comportamiento fermentativo	31
7.4.2	Concentración celular.....	31
7.4.3	Viabilidad celular	31
7.4.4	Volumen de inoculación	32
7.5	Tercera reutilización (R3).....	32
7.5.1	Comportamiento fermentativo	32
7.5.2	Concentración celular.....	32
7.5.3	Viabilidad celular	32
7.5.4	Volumen de inoculación	33
7.6	Interpretación.....	33
7.7	Reducción de costos por reutilización de levadura.....	34
8	CONCLUSIONES.....	36
9	RECOMENDACIONES	37
10	BIBLIOGRAFÍA	38
11	ANEXOS.....	39

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Origen y evolución histórica de la levadura	9
Cuadro 2.	Historia y desarrollo de la cerveza	11
Cuadro 3.	Factores que influyen en la fermentación	19
Cuadro 4.	Influencia en el perfil sensorial de la cerveza	19
Cuadro 5.	Factores que afectan la reutilización	20
Cuadro 6.	Parámetros APA	23
Cuadro 7.	Fermentación y Post-Fermentación (APA)	27
Cuadro 8.	Fermentación y Post-Fermentación (APA) R1	30

Cuadro 9. Fermentación y Post-Fermentación (APA) R2	31
Cuadro 10. Fermentación y Post-Fermentación (APA) R3	32
Cuadro 11. Resumen de parámetros en reutilización de levadura	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la planta de Cadejo Brewing Company en Zona Rosa.	3
---	---

ÍNDICE DE ANEXOS

A- 1 Molino	39
A- 2 Tanque de maceración, hervor y centrifugación	39
A- 3 Fermentadores	39
A- 4 BBT	40
A- 5 Levadura US05.....	40
A- 6 Microscopio	40
A- 7 pH metro	41
A- 8 Preparación de muestra de levadura diluida	41
A- 9 Conteo de levadura	41
A- 10 Células de levadura bajo microscopio R1	42
A- 11 Células de levadura bajo microscopio R2	42
A- 12 Células de levadura bajo microscopio R3	42

1 INTRODUCCIÓN

La levadura desempeña un papel fundamental en la producción cervecera, ya que es el microorganismo responsable de la conversión de los azúcares fermentables en etanol, dióxido de carbono y compuestos secundarios que influyen directamente en el perfil sensorial de la cerveza. Su adecuada gestión impacta no solo en la calidad del producto final, sino también en la eficiencia y estabilidad del proceso fermentativo.

En la producción artesanal, el uso de levadura seca activa en cada lote representa un costo operativo significativo. Frente a esta situación, la reutilización de levadura se presenta como una alternativa técnica orientada a optimizar recursos y reducir costos. No obstante, las reutilizaciones sucesivas pueden generar una disminución progresiva de la viabilidad celular y del vigor metabólico, lo que puede afectar la fermentación y el rendimiento del proceso si no se cuenta con un control microbiológico adecuado.

En este contexto, la presente práctica profesional se enfocó en desarrollar e implementar un método para la reutilización controlada de levadura en la elaboración de una cerveza American Pale Ale, evaluando su concentración celular, viabilidad y comportamiento fermentativo a lo largo de generaciones sucesivas. Asimismo, se analizó el impacto económico derivado de esta estrategia dentro de la empresa intervenida.

Los resultados obtenidos permiten aportar criterios técnicos para la toma de decisiones relacionadas con el número de reutilizaciones permitidas, el ajuste de la tasa de inoculación y la estandarización del control microbiológico, contribuyendo a mejorar la eficiencia productiva y la sostenibilidad del proceso cervecero artesanal.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Desarrollar y aplicar un sistema de reutilización de levadura cervecera que permita evaluar su eficiencia fermentativa y su impacto en la reducción de costos operativos dentro de la producción cervecera.

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar la viabilidad celular y el estado fisiológico de la levadura reutilizada (slurry) previo a su inoculación en fermentaciones sucesivas.
- Determinar la eficiencia fermentativa de la levadura reutilizada mediante el seguimiento de parámetros como atenuación, tiempo de fermentación y rendimiento del proceso.
- Cuantificar la reducción de costos operativos asociada a la reutilización de levadura, comparando con el uso de levadura fresca en cada ciclo de fermentación.

3 INFORMACIÓN DE LA UNIDAD PRODUCTIVA

3.1 Datos generales

3.1.1 Localización

La empresa Cadejo Brewing Company S.A. de C.V. está ubicada en Calle La Reforma #222, Zona Rosa, San Salvador, El Salvador, en las coordenadas geográficas $13.693770951544987^{\circ}$ N y $-89.23523573456474^{\circ}$ O. Su localización estratégica facilita el acceso a proveedores y la distribución en el área metropolitana y otros puntos del país. En esta dirección se encuentra la planta principal de producción y el restaurante, lo que permite integrar el proceso productivo con la experiencia gastronómica. En la Figura 1 se presenta la ubicación geográfica de la empresa dentro de la Zona Rosa de San Salvador.



Figura 1. Ubicación de la planta de Cadejo Brewing Company en Zona Rosa. Fuente: Google Maps (2026).

3.1.2 Antecedentes

Fundada el 18 de febrero de 2013 en la Zona Rosa de San Salvador, Cadejo se consolidó como una de las cervecerías artesanales más importantes de Centroamérica. La empresa se caracteriza por utilizar materias primas seleccionadas, tanto importadas como locales, y por elaborar cerveza 100 % natural, sin adjuntos, priorizando la calidad y el desarrollo de la cultura cervecera en el país.

3.2 Recursos

3.2.1 Recursos naturales e industriales

La producción utiliza como insumos principales:

- Agua potable, suministrada por Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA).
- Cebada malteada, suministrada por Boortmalt.
- Lúpulo, suministrado por Hopsteiner.
- Levadura, suministrada por Fermentis.
- Frutas y especias locales, adquiridas a proveedores nacionales.

Como recursos industriales se emplean:

- Energía eléctrica, suministrada por DELSUR.
- Gases industriales (CO_2 y O_2), suministrados por INFRASAL.

Estos recursos permiten desarrollar el proceso cervecero, desde la elaboración del mosto hasta la fermentación y carbonatación.

3.2.2 Recursos físicos

La planta cuenta con:

- Área de producción: molino (Anexo A-1), macerador, olla de cocción, intercambiador de calor, centrifugadora (Anexo A-2).
- 7 fermentadores (Anexo A-3) y 3 tanques BBT (Anexo A-4).
- Línea de embotellado y línea de barriles.
- Pasteurizadora y cuarto frío.
- Laboratorio equipado (microscopio, pH-metro, refractómetro, balanzas y vidriería).

Estos equipos garantizan control del proceso, calidad microbiológica y estabilidad del producto final.

3.2.3 Recursos humanos

La empresa se organiza en las siguientes áreas:

- **Producción:** jefe de producción y 3 operadores.
- **Calidad:** jefe de calidad.
- **Bodega y logística:** jefe y 4 auxiliares.

- **Mantenimiento:** jefe y 4 técnicos.

El equipo asegura la continuidad operativa, control de calidad y distribución eficiente.

3.3 Actividades actuales

3.3.1 Producción principal

La actividad principal es la producción de cerveza artesanal tipo Ales y Lagers, además de ediciones especiales con ingredientes locales.

También se elaboran productos complementarios como:

- **Agua Dura** (hard seltzer 4.3 % ABV, sabores frutales).
- **Agua Freska** (denominada comercialmente así por la empresa, corresponde a una bebida carbonatada sin alcohol con sabores tropicales.).

Además, se realizan tours, catas guiadas e innovación en nuevos estilos.

3.3.2 Situación técnica

La planta se divide en tres áreas principales: el área caliente, donde se realizan las operaciones de molienda, maceración y cocción; el área fría, destinada a los procesos de fermentación y carbonatación; y el área de llenado, donde se lleva a cabo el envasado de la cerveza en botellas y barriles. El proceso incluye molienda, maceración, cocción con lúpulo, centrifugación, enfriamiento, fermentación (Ales o Lagers), filtración, carbonatación y envasado. Las botellas se pasteurizan en la planta del Plan de La Laguna y luego regresan al cuarto frío para almacenamiento y distribución.

3.3.3 Situación administrativa

- Gerente general
- Gerente de operaciones
- Gerente de producción
- Gerente de marca
- Chef ejecutivo
- Gerente financiero
- Auditor de calidad
- Encargado de informática
- Jefe de Recursos humanos

- Responsable de operaciones en Guatemala

3.3.4 Comercialización

Los productos se distribuyen a través de brewpubs propios, así como en supermercados, licoreras y restaurantes; además, una parte de la producción se destina a exportación. Las estrategias de promoción incluyen el uso de redes sociales, lanzamientos de nuevos estilos de cerveza, realización de eventos en brewpubs, catas guiadas y recorridos dentro de la planta de producción.

4 ANÁLISIS DE PROBLEMÁTICAS

Durante el desarrollo de la pasantía y conforme a las actividades establecidas en el cronograma, se identificaron problemáticas relacionadas con la estandarización del conteo celular, la variabilidad en la viabilidad de la levadura reutilizada y el impacto económico del uso de levadura fresca en cada producción.

4.1 Disminución de viabilidad en generaciones sucesivas

4.1.1 Problema identificado

Durante los conteos realizados en las distintas generaciones, se observó una tendencia a la reducción de viabilidad celular conforme aumentaba el número de reutilizaciones.

Esto implicaba riesgo de:

- Fermentaciones más lentas
- Pérdida de rendimiento
- Alteraciones sensoriales

4.1.2 Acción implementada

Se implementó un control integral de la levadura reutilizada mediante la evaluación sistemática de la viabilidad y concentración celular a través de conteo microscópico previo a cada inoculación. Adicionalmente, se estandarizó el cálculo del volumen de inoculación en función de la concentración celular obtenida, con el objetivo de mantener una tasa de inoculación adecuada en cada ciclo fermentativo. Asimismo, se estableció un límite de reutilización basado en el comportamiento fermentativo y la viabilidad celular, considerando como criterio de referencia una disminución significativa en la velocidad de fermentación y en el porcentaje de células viables.

4.1.3 Impacto generado

Se mantuvo estabilidad fermentativa hasta la generación evaluada, comprobando que el control técnico permite prolongar el uso de la levadura sin comprometer la eficiencia del proceso ni la calidad del producto.

4.2 Impacto económico del uso de levadura fresca

4.2.1 Problema identificado

El uso de levadura seca en cada lote representa un costo significativo dentro de la producción artesanal.

4.2.2 Acción implementada

Se realizó un análisis comparativo de costos entre:

- Uso de levadura seca
- Reutilización en generaciones sucesivas

4.2.3 Impacto generado

Se evidenció una reducción potencial de costos por lote, lo cual fortalece la viabilidad económica del sistema de reutilización implementado.

5 MARCO TEORICO

5.1 Antecedentes

La levadura ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de procesos de fermentación utilizados en la producción de alimentos y bebidas desde tiempos antiguos. A lo largo de la historia, diversos descubrimientos científicos han permitido comprender mejor su funcionamiento y su importancia en la industria. En el Cuadro 1 se presenta una síntesis del origen y evolución histórica de la levadura a través de los años.

Cuadro 1. Origen y evolución histórica de la levadura

Periodo / Año	Acontecimiento histórico
~4000 a.C.	Los egipcios utilizaban levadura para producir pan; se han encontrado herramientas para moles granos, cámaras de cocción y jeroglíficos relacionados.
1600–1046 a.C. (Dinastía Shang, China)	Uso de la levadura para preparar licor.
206 a.C.–220 d.C. (Dinastía Han, China)	Empleo de levadura para elaborar tortas al vapor y dulces.
1680	Antonie van Leeuwenhoek observa por primera vez la levadura al microscopio.
Siglo XIX	Louis Pasteur descubre funciones esenciales de la levadura y su importancia para aromas y sabores en panificación.
Siglo XIX	Pasteur demuestra que la levadura puede vivir con o sin oxígeno.
1846	Inicia la producción industrial de levadura en Europa.
Principios del siglo XX	Se descubre que la levadura se multiplica rápidamente con aire sin producir alcohol, permitiendo el desarrollo de cultivos industriales más eficientes.

Adaptado de ZEUS IBA (2020)

5.1.1 Fermentación espontánea y domesticación temprana de levaduras

Los cerveceros de la antigüedad dependían del clima y de la temperatura ambiente, así como de la fermentación espontánea, antes del desarrollo de cervecerías centralizadas y sistemas de refrigeración (Raihofer et al., 2022). Las cervezas obtenidas mediante fermentación espontánea presentaban una calidad y un sabor muy variables, y en ocasiones incluso resultaban imbebibles cuando eran afectadas por infecciones de levaduras silvestres o bacterias agriadoras, especialmente durante los meses más cálidos del año. Con el tiempo, se comenzó a utilizar el sedimento del recipiente de fermentación para iniciar la

siguiente elaboración, al observar que esta práctica mejoraba la calidad de la cerveza. Como resultado, cada cervecería fue “domesticando” y desarrollando sus propias cepas de levadura (Raihofer et al., 2022).

5.1.2 Elaboración empírica y aportes monásticos en la Edad Media

Sin embargo, hasta finales de la Edad Media, la elaboración de cerveza era en gran medida empírica y se desconocía la existencia y función de los organismos involucrados. La fermentación se consideraba una fuerza natural y el conocimiento práctico de la elaboración de cerveza se transmitía de generación en generación (Raihofer et al., 2022).

Los monasterios desempeñaron un papel importante en ese sentido, ya que mantenían registros meticulosos de las actividades de elaboración de cerveza. A partir de finales de la Edad Media, muchos alquimistas mostraron un mayor interés en las causas de la fermentación. En 1674, el naturalista holandés Antoni van Leeuwenhoek (1632-1723) descubrió y describió por primera vez los microorganismos bajo el microscopio. Alrededor de 1680, también fue el primero en observar la levadura que había aislado del sustrato de fermentación. De hecho, la levadura fue el primer microorganismo estudiado por los científicos, debido a sus grandes células e importancia económica (Raihofer et al., 2022).

5.1.3 Descubrimiento de la levadura como microorganismo

Pero no fue hasta mediados del siglo XIX que varios científicos reconocieron de forma independiente la levadura como el organismo fermentador. Fue una época en la que las ciencias naturales en general experimentaron una rápida expansión, no solo generando un enorme caudal de conocimientos, sino también aplicándolos a la práctica. Investigaciones posteriores sobre la fermentación alcohólica sentaron las bases científicas para el estudio del metabolismo celular, especialmente la función de las enzimas (Raihofer et al., 2022).

5.1.4 Desarrollo de cultivos puros y avances científicos del siglo XIX

El botánico danés Emil Christian Hansen (1842-1909) y el higienista alemán Robert Koch (1843-1910) aislaron células individuales y propagándolas en el laboratorio en condiciones libres de gérmenes. Este fue el comienzo de las levaduras cultivadas «puras» e hizo posible por primera vez iniciar fermentaciones microbiológicamente limpias. Hansen había estado investigando la llamada «enfermedad de la cerveza» como empleado del Laboratorio

Carlsberg desde 1878. También aisló levaduras silvestres y descubrió que solo unas pocas cepas de levadura eran adecuadas para la elaboración de cerveza. Louis Pasteur reconoció el papel de las bacterias acidificantes en el deterioro y la acidificación de la cerveza. También fue el primero en distinguir entre la vida aeróbica y anaeróbica: «... la fermentación siempre está asociada con la vida de la célula de levadura, pero sin oxígeno» (Raihofer et al., 2022).

5.1.5 Historia y desarrollo de la cerveza

La cerveza es una de las bebidas fermentadas más antiguas de la humanidad y su desarrollo ha estado ligado a la evolución de las civilizaciones, las prácticas agrícolas y los avances tecnológicos en los procesos de fermentación. A lo largo del tiempo, diferentes culturas han contribuido al perfeccionamiento de su elaboración y a la diversificación de sus estilos. En el Cuadro 2 se presenta una síntesis de la historia y el desarrollo de la cerveza desde sus orígenes hasta su expansión en la producción moderna.

Cuadro 2. Historia y desarrollo de la cerveza

Sección	Contenido
Orígenes antiguos de la cerveza	La cerveza se originó alrededor del 4000 a. C. en Mesopotamia. Su descubrimiento fue accidental al fermentar granos con agua. Para los sumerios tenía valor alimentario por su aporte energético y se asociaba simbólicamente a la diosa Ninkasi.
Desarrollo en Egipto	La cerveza egipcia, llamada <i>zythum</i> , era parte de la dieta diaria de las clases populares, mientras que el vino era para la élite. Los egipcios desarrollaron producción a gran escala, aromatizaron con miel, comino y jengibre, y la utilizaron como medio de intercambio económico.
Expansión hacia otras culturas	Los griegos heredaron las técnicas cerveceras egipcias y luego fueron adoptadas por los romanos (quienes la llamaron <i>cerevisia</i>). La cerveza se adaptó según los cereales locales: trigo en China, centeno en Rusia, arroz en Japón y maíz en culturas precolombinas. La tradición europea central y oriental consolidó la cerveza de cebada moderna.
Proceso de elaboración	El proceso inicia con el malteado, seguido de molienda y maceración. El mosto se hierva con lúpulo para aportar amargor y conservación. Luego se fermenta con levadura, transformando azúcares en alcohol. Las variaciones en técnicas e ingredientes originan la diversidad de estilos cerveceros.

La cerveza en la Edad Media y la influencia monástica	La cerveza fue un alimento básico en el norte de Europa, conocida como “pan líquido”. Los monasterios mejoraron los procesos, incorporaron el uso sistemático del lúpulo y lograron cervezas más duraderas, claras y de alta calidad.
Expansión en Europa moderna	En España se popularizó en el siglo XVI durante el reinado de Carlos I, quien instaló una fábrica en Yuste. Japón inició su producción moderna en 1876 influenciada por expertos alemanes. En los siglos XVIII y XIX, la máquina de vapor y los estudios de Pasteur revolucionaron la producción al permitir mayor control y estandarización.

Adaptado de Historia de la cerveza (Secretaría de Cultura de la Nación, 2019).

5.2 Biología y clasificación de *Saccharomyces cerevisiae*

5.2.1 Clasificación y características generales

Saccharomyces cerevisiae es la especie de levadura más utilizada en la elaboración de cerveza, responsable de fermentar azúcares para producir alcohol y compuestos que aportan aroma y sabor a la bebida (Zainasheff & White, 2010). La levadura *Saccharomyces cerevisiae* es el microorganismo principal en la fermentación alcohólica de la cerveza, desempeñando un papel central en la transformación de los azúcares del mosto en etanol y dióxido de carbono. Además de su función metabólica, esta levadura contribuye significativamente al perfil sensorial final del producto mediante la producción de compuestos volátiles como ésteres, alcoholes superiores y compuestos azufrados. Desde el punto de vista biotecnológico, *S. cerevisiae* ha sido domesticada a lo largo de los siglos, lo que ha permitido seleccionar cepas con características fermentativas específicas. En la industria cervecera se distinguen principalmente dos tipos de levaduras: las de fermentación alta (ale) y las de fermentación baja (lager), cada una con particularidades genéticas, metabólicas y de comportamiento físico como la floculación y la tolerancia al etanol (Lodolo et al., 2008). La calidad de la fermentación depende en gran medida del estado fisiológico de la levadura, el cual está influenciado por factores como la composición del mosto (azúcares, aminoácidos, minerales), la disponibilidad de oxígeno, el pH, la temperatura y el manejo de la levadura durante su propagación, almacenamiento y reutilización (Lodolo et al., 2008).

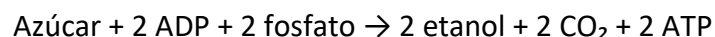
5.2.2 Crecimiento y fases de la fermentación de la levadura

Las células individuales de levadura no aumentan significativamente de tamaño durante su vida útil; sin embargo, pueden presentar un ligero incremento a medida que envejecen. En términos microbiológicos, cuando se habla del crecimiento de la levadura no se hace referencia al aumento del tamaño celular, sino al incremento en el número de células presentes en el medio. Es decir, el crecimiento implica la multiplicación celular y, por tanto, el aumento de la población de levaduras. La levadura puede obtener la energía y los nutrientes necesarios para su crecimiento a través de diferentes rutas metabólicas, aunque algunas resultan más eficientes y beneficiosas que otras (White & Zainasheff, 2010).

Tras la inoculación en el mosto, las células utilizan inicialmente sus reservas internas de glucógeno y el oxígeno disponible para revitalizar y fortalecer sus membranas celulares. Este proceso optimiza la permeabilidad y mejora el transporte de nutrientes y azúcares hacia el interior celular. Las células absorben rápidamente el oxígeno disuelto y, posteriormente, comienzan a captar azúcares y otros nutrientes presentes en el mosto. Algunos compuestos atraviesan la membrana celular mediante difusión facilitada, mientras que otros requieren sistemas específicos de transporte activos (White & Zainasheff, 2010). Debido a que la levadura metaboliza ciertos azúcares con mayor facilidad que otros, estos se consumen siguiendo un orden específico: primero glucosa, luego fructosa y sacarosa, posteriormente maltosa y finalmente maltotriosa. En un mosto típico elaborado con malta, la mayor proporción de azúcares corresponde a la maltosa, seguida por cantidades menores de glucosa y maltotriosa. La glucosa ingresa a la célula principalmente mediante difusión facilitada, sin requerir gasto energético adicional (White & Zainasheff, 2010).

5.2.3 Cronología y metabolismo de la fermentación

Una vez que se inocula la levadura, ¿qué hacen las células? La respuesta común es que consumen los azúcares del mosto y los transforman en nuevas células de levadura, etanol, dióxido de carbono y compuestos de sabor (White & Zainasheff, 2010).



Para maximizar la producción de compuestos de sabor adecuados, es útil conocer cómo progresa la levadura durante la fermentación cervecera. Algunos expertos dividen la

fermentación en cuatro o más fases: latencia, crecimiento, fermentación y sedimentación. En la práctica, gran parte de la actividad de la levadura no sigue fases claramente definidas con inicios y finales precisos; existe una superposición considerable entre ellas. Por ejemplo, al inicio se presentan simultáneamente el crecimiento celular y la fermentación. Afirmar que las células se encuentran en una sola fase en un momento dado no siempre es correcto, ya que las células individuales avanzan por el proceso fermentativo a diferentes velocidades (White & Zainasheff, 2010). Para simplificar, se puede considerar que la fermentación en el mosto cervecero consta de tres fases: fase de latencia (0 a 15 horas), fase de crecimiento exponencial (1 a 4 días) y fase estacionaria (3 a 10 días). Más que las fases en sí, lo importante es que el cervecero comprenda qué obtiene la levadura de la fermentación y qué aporta esta al producto final (White & Zainasheff, 2010).

5.2.4 Fase de latencia

Cuando la levadura es inoculada en el mosto, inicia un proceso de adaptación al nuevo entorno conocido como fase de latencia. Aunque en esta etapa no se observa actividad visible intensa, a nivel celular se desarrollan importantes procesos metabólicos. Las células comienzan a absorber oxígeno, minerales y aminoácidos (fuente de nitrógeno) del mosto, y a sintetizar proteínas esenciales para su crecimiento y división. Si la levadura no encuentra en el medio los aminoácidos necesarios, es capaz de sintetizarlos. El mosto elaborado 100% con malta constituye una excelente fuente de nitrógeno, minerales y vitaminas, proporcionando la mayoría de los micronutrientes requeridos para una fermentación adecuada. Entre las vitaminas esenciales se encuentran la riboflavina, el inositol y la biotina. Los minerales más importantes incluyen fósforo, azufre, cobre, hierro, zinc, potasio y sodio. A medida que estos nutrientes son incorporados, la levadura comienza a producir las enzimas necesarias para el crecimiento celular. En algunos casos, el mosto puede suplementarse con nutrientes comerciales para optimizar el desempeño de la levadura, siendo el zinc uno de los elementos más frecuentemente limitantes en la fermentación (White & Zainasheff, 2010).

5.2.5 Fase exponencial

Al finalizar la fase de latencia, la levadura entra en la fase exponencial o de crecimiento activo. En esta etapa se incrementa rápidamente el número de células, se produce dióxido de carbono (CO_2) y comienza la formación significativa de etanol y compuestos responsables del perfil sensorial de la cerveza. Durante esta fase se forma en la superficie del fermentador una capa de espuma denominada *krausen*. En el caso de muchas levaduras tipo ale neutras, pueden generarse aromas característicos, a veces descritos como similares a aceitunas. La levadura consume inicialmente los azúcares simples: glucosa, fructosa y sacarosa. Posteriormente metaboliza la maltosa, que representa aproximadamente el 59 % de los azúcares presentes en el mosto y es fundamental para el carácter cervecero. La maltosa es hidrolizada por enzimas maltasas, transformándose en moléculas de glucosa que pueden ser fermentadas. Finalmente, los azúcares más complejos como la maltotriosa son fermentados; sin embargo, no todas las cepas poseen la misma eficiencia para metabolizarlos. La capacidad de fermentar maltotriosa determina en gran medida el grado de atenuación de cada cepa (White & Zainasheff, 2010).

5.2.6 Fase estacionaria

En la fase estacionaria el crecimiento celular disminuye considerablemente. Para este momento, la mayor parte del etanol y de los compuestos de sabor y aroma (como alcoholes superiores, ésteres y compuestos sulfurados) ya han sido producidos. No obstante, la cerveza aún se considera “verde”, debido a la presencia de compuestos característicos de una cerveza joven. Durante la etapa de maduración o acondicionamiento, la levadura reabsorbe y reduce compuestos como el diacetilo y el acetaldehído, mientras que el sulfuro de hidrógeno se libera en forma gaseosa. En esta fase el *krausen* colapsa y la levadura comienza a flocular y sedimentar. Es fundamental verificar el grado de atenuación, ya que algunas cepas pueden flocular prematuramente antes de completar la fermentación, lo que puede requerir acciones correctivas. En cervecerías industriales es común realizar un enfriamiento gradual hasta temperaturas de 2–4 °C para acelerar la clarificación (White & Zainasheff, 2010).

5.3 Vitalidad y viabilidad celular en la fermentación cervecera

5.3.1 Factores que influyen en la vitalidad y viabilidad celular

La salud de la levadura depende de su nutrición, incluyendo vitaminas y minerales esenciales. Mantener condiciones óptimas de viabilidad y vitalidad garantiza fermentaciones eficientes y la posibilidad de reutilizar los cultivos (Zainasheff & White, 2010).

5.3.2 Relevancia de la viabilidad celular

Relevancia de la viabilidad: La determinación de la viabilidad celular mediante tinciones como el azul de metileno es clave para evaluar qué porcentaje de la población se encuentra en condiciones funcionales para fermentar. White y Zainasheff (2010) señalan que una levadura con alta viabilidad no solo fermenta de manera más predecible, sino que también presenta mejor tolerancia al alcohol y mayor capacidad para completar el metabolismo de azúcares complejos. Por ello, la evaluación de viabilidad forma parte de los estándares de control en la industria cervecera.

5.3.3 Viabilidad y vitalidad de levaduras reutilizadas

En la reutilización seriada, la viabilidad celular puede verse afectada por el estrés acumulativo que sufren las células durante cada fermentación, incluyendo la exposición a concentraciones elevadas de etanol, deficiencias nutricionales y variaciones de temperatura. Estos factores pueden disminuir la capacidad fermentativa y el rendimiento metabólico de la levadura en sucesivos ciclos de repitching (Layfield & Sheppard, 2015).

Estudios de Layfield y Sheppard (2015) destacan que levaduras con alta viabilidad, pero baja vitalidad puede presentar fermentaciones más lentas, lo que se traduce en desviaciones en el perfil sensorial del producto y un aumento del tiempo de proceso. Asimismo, los autores señalan que la calidad del mosto y la práctica de manejo de la levadura, incluyendo el tiempo de almacenamiento entre fermentaciones y la concentración de oxígeno disuelto en el inoculado, influyen directamente en el número de reutilizaciones viables. Un control inadecuado de estas variables puede acelerar la pérdida de integridad celular y afectar la consistencia del sabor y aroma de la cerveza (Layfield & Sheppard, 2015).

5.3 Conteo celular y control del cultivo

5.3.1 Importancia del conteo celular

Importancia del conteo celular: El conteo celular es un procedimiento fundamental para evaluar el estado fisiológico y la salud de la levadura durante la fermentación cervecera. Esta técnica permite determinar la concentración y viabilidad del cultivo, lo cual es esencial para ajustar adecuadamente el pitching rate y garantizar una fermentación eficiente. De acuerdo con White y Zainasheff (2010), la densidad celular influye directamente en la velocidad de fermentación y en la producción de compuestos de sabor, por lo que un control adecuado asegura estabilidad y calidad en el producto final.

5.3.2 Factores que afectan el conteo celular

Factores que afectan el conteo: Diversos factores pueden afectar la precisión del conteo de levaduras, incluyendo la floculación, el tamaño celular, la homogenización previa de la muestra y el manejo adecuado de la cámara de Neubauer. White y Zainasheff (2010) explican que la correcta dilución y dispersión de la levadura son esenciales para obtener lecturas representativas, especialmente en cultivos con tendencias elevadas a la agregación celular.

5.3.3 Métodos de estimación de concentración celular

Muchos cerveceros se preocupan por determinar un conteo celular exacto. Si bien conocer el número exacto de células es útil, la consistencia es aún más importante. Una vez determinada la cantidad de levadura que funciona bien para una cerveza en particular (independientemente del método de medición), se debe utilizar esa misma cantidad en cada elaboración. El método más sencillo para determinar la cantidad de levadura es medir el volumen o el peso del slurry (suspensión de levadura). Una vez que se tiene esta medida, se puede utilizar un microscopio o un espectrofotómetro para contar células y luego calcular cuántas células hay en todo el slurry (White & Zainasheff, 2010).

5.4 Conservación y reutilización de levaduras

5.4.1 Prácticas adecuadas para la conservación y reutilización

El control de temperatura, la oxigenación adecuada y la pureza del cultivo son fundamentales para preservar la levadura y asegurar resultados consistentes en fermentaciones sucesivas (Zainasheff & White, 2010).

5.5 Tasas de inoculación y desempeño fermentativo

5.5.1 Tasas de inoculación (Pitching Rates)

La elaboración de cerveza consistente y de alta calidad requiere mediciones precisas. Una de las mediciones más importantes, especialmente en lo relacionado con la fermentación, es la tasa de inoculación de levadura (pitching rate). Sin tasas de inoculación consistentes, el perfil de sabor puede variar significativamente de un lote a otro (White & Zainasheff, 2010).

5.5.2 Consecuencias de la sobre inoculación y sub-inoculación

En general, la sub-inoculación afecta más al sabor, mientras que la sobre inoculación afecta negativamente la salud de la levadura a lo largo de varias generaciones. Sin embargo, ambas pueden dar como resultado una fermentación deficiente, con altos niveles de diacetilo, acetaldehído y baja atenuación. Una tasa de inoculación demasiado alta también puede generar niveles bajos o inesperados de ésteres, sabores derivados de la autólisis de la levadura y una pobre retención de espuma. Por otro lado, una tasa de inoculación demasiado baja puede provocar fermentaciones lentas y tiempos de latencia muy prolongados, lo que permite el crecimiento de bacterias competidoras y levaduras salvajes en el mosto. Si se debe elegir entre sub-inocular o sobre inocular, la sobre inoculación suele ser ligeramente más tolerante antes de que se evidencien defectos en la fermentación (White & Zainasheff, 2010).

5.3.4 Factores que influyen en la fermentación

El proceso de fermentación es una etapa fundamental en la producción de cerveza, ya que durante esta fase la levadura transforma los azúcares del mosto en alcohol y dióxido de carbono, además de generar diversos compuestos que influyen en el aroma y sabor final. Este proceso puede verse afectado por diferentes variables relacionadas con el medio de fermentación y las características de la levadura. En el Cuadro 3 se presentan algunos de los principales factores que influyen en la fermentación cervecera y su efecto sobre el desempeño de la levadura.

Cuadro 3. Factores que influyen en la fermentación

Factores	Como influye
Temperatura	Controla la velocidad de fermentación y el perfil aromático. Temperaturas altas (>22 °C) aumentan ésteres y alcoholes superiores; temperaturas bajas (<12 °C) ralentizan la fermentación y retienen compuestos sulfurados.
Oxígeno	Esencial en la fase inicial para la síntesis de esteroides y ácidos grasos insaturados, claves para la salud de la membrana celular. Sin oxígeno, la levadura no puede reproducirse eficientemente.
pH	El mosto debe estar entre 4.2 y 5.6. Valores fuera de este rango pueden inhibir la actividad enzimática y aumentar la producción de compuestos indeseables como ácido acético.
Nutrientes	La levadura requiere nitrógeno (aminoácidos), fósforo, zinc, biotina y otros minerales. La carencia de zinc, por ejemplo, reduce la actividad del alcohol deshidrogenasa y puede detener la fermentación.
Tipo de levadura	Cada cepa tiene un comportamiento único: algunas floculan temprano y dejan azúcares residuales; otras atenúan más y producen perfiles más secos. La selección de la cepa es determinante del carácter final de la cerveza.

Adaptado de *Yeast: The Practical Guide to Beer Fermentation* (White & Zainasheff, 2010).

5.3.5 Influencia en el perfil sensorial de la cerveza

La levadura no solo participa en la transformación de azúcares durante la fermentación, sino que también desempeña un papel clave en la formación de compuestos que determinan las características sensoriales de la cerveza. Durante este proceso se generan y transforman diferentes metabolitos que influyen en el aroma, sabor, cuerpo y contenido alcohólico de la bebida. En el Cuadro 4 se presentan algunos parámetros relacionados con la influencia de la levadura en el perfil sensorial de la cerveza.

Cuadro 4. Influencia en el perfil sensorial de la cerveza

Parámetro	Efecto de la levadura
Aroma	Producción de ésteres (frutal), alcoholes superiores (caliente, solvente), fenoles (clavo, vainilla).
Sabor	Reducción de diacetil (mantequilla), acetaldehído (manzana verde) y compuestos sulfurados (huevo podrido) durante la maduración.
Cuerpo	Atenuación variable: cepas altamente fermentadoras dejan cervezas más secas; cepas menos atenuantes dejan azúcares residuales y cuerpo mayor.
Alcohol	La cepa y su tolerancia alcohólica determinan el grado alcohólico final; algunas cepas pueden detenerse antes si el medio se vuelve tóxico.

Adaptado de *Yeast: The Practical Guide to Beer Fermentation* (White & Zainasheff, 2010).

5.3.6 Concepto y justificación de reutilización

La reutilización de levadura consiste en recolectar la biomasa fermentativa tras finalizar el ciclo y emplearla como inóculo en un lote posterior. Esta práctica se justifica porque la levadura permanece viva y metabólicamente activa al final de la fermentación, permitiendo ahorrar costos de adquisición de nuevas cepas y mantener un perfil sensorial consistente en la línea de productos (White & Zainasheff, 2010).

5.3.7 Ventajas económicas y productivas

- Reducción de costos de compra de levadura fresca o cultivos industriales.
- Menor tiempo de latencia (lag phase) al utilizar levadura ya adaptada al entorno de la cervecería.
- Mayor uniformidad entre lotes, lo que reduce variaciones de sabor y atenuación.

5.3.8 Factores que afectan la reutilización

La reutilización de levadura es una práctica común en la industria cervecera, ya que permite optimizar recursos y mantener la continuidad del proceso fermentativo. Sin embargo, su desempeño puede verse afectado por diversos factores relacionados con el manejo, las condiciones de almacenamiento y el número de reutilizaciones. Estas condiciones pueden influir en la viabilidad, vitalidad y estabilidad genética de la levadura. En el Cuadro 5 se presentan algunos de los principales factores que afectan la reutilización de levadura.

Cuadro 5. Factores que afectan la reutilización

Factor	Efecto
Manejo	Recolección temprana o tardía selecciona subpoblaciones con distinta floculación y atenuación.
Almacenamiento	Temperaturas >4 °C y tiempos >7 días reducen viabilidad; CO ₂ acumulado puede lisar células.
Número de ciclos	A partir de la 5. ^a –10. ^a generación se observa deriva genética y pérdida de atenuación.
Contaminación	Levaduras salvajes o bacterias ácido-lácticas compiten por nutrientes y alteran el perfil sensorial.
Estrés celular	Presión hidrostática en fermentadores cónico-cilíndricos, etanol residual y temperatura generan proteínas de choque térmico que debilitan la membrana.

Adaptado de *Yeast: The Practical Guide to Beer Fermentation* (White & Zainasheff, 2010).

6 METODOLOGÍA

6.1 Diseño del proceso fermentativo y evaluación de levadura

6.1.1 Caracterización del estilo y selección de levadura

Para la evaluación del desempeño fermentativo se elaboró una American Pale Ale (APA), uno de los estilos más representativos dentro del sector cervecero artesanal. Este estilo se caracteriza por presentar una densidad original (OG) típica entre 12 y 14 °Plato, una densidad final (FG) entre 2.5 y 3.5 °Plato y un contenido alcohólico aproximado de 4 a 6 % v/v (Beer Judge Certification Program , 2021). Asimismo, se distingue por su perfil limpio y balanceado, donde el carácter del lúpulo es predominante y la fermentación no aporta ésteres excesivos. La elección de este estilo respondió a su amplia popularidad comercial y a que representa un modelo fermentativo estándar, adecuado para evaluar el comportamiento y la eficiencia de la levadura en condiciones controladas.

Para la fermentación se utilizó la cepa comercial SafAle US-05 (Anexo A-5), correspondiente a una levadura tipo American Ale (*Saccharomyces cerevisiae*). Esta cepa es ampliamente empleada en la producción de Pale Ales debido a su perfil neutro, alta atenuación y comportamiento estable en fermentación (Fermentis, 2026).

6.1.2 Características técnicas de la levadura

- Tipo: Ale
- Rango óptimo de temperatura: 18–26 °C
- Perfil sensorial: limpio y neutro, favorece la expresión del lúpulo
- Floculación: media

La dosificación empleada correspondió a levadura seca activa en presentación de 11.5 gramos (Fermentis, 2026), adecuada para un volumen aproximado de 20 Litros. Las condiciones operativas de fermentación se mantuvieron entre 19 y 21 °C.

6.1.3 Determinación de la atenuación aparente

La atenuación aparente se determinó a partir de la densidad original (OG) y la densidad final (FG), ambas expresadas en grados Plato (°P), mediante la siguiente ecuación (White & Zainasheff, 2010):

$$\text{Atenuación aparente (\%)} = [(OG - FG) / OG] \times 100$$

Donde:

- OG = densidad original (°P)
- FG = densidad final (°P)

6.1.4 Estimación del contenido alcohólico

El contenido alcohólico se estimó a partir de la diferencia entre la gravedad específica inicial y final, utilizando la siguiente fórmula empírica (White & Zainasheff, 2010):

$$\text{ABV (\%)} \approx (\text{OG} - \text{FG}) \times 131$$

Para ello, los valores en grados Plato fueron previamente convertidos a gravedad específica (SG).

6.1.5 Determinación de la concentración celular

La concentración celular de la levadura se determinó mediante el uso de una cámara de Neubauer, aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Células/mL} = (\text{Número de células contadas} \times 5 \times \text{Factor de dilución} \times 10^4)$$

Donde:

- El número de células contadas corresponde al promedio obtenido en los cuadrantes analizados
- El factor 5 corresponde al número de cuadrantes evaluados
- El factor de dilución de 200
- 10^4 es el factor de conversión asociado al volumen de la cámara

Este método es ampliamente utilizado para la cuantificación celular en levaduras durante procesos de fermentación, permitiendo estimar la concentración de células viables en suspensión (White & Zainasheff, 2010).

6.1.6 Determinación de la viabilidad celular

La viabilidad celular se determinó mediante tinción con azul de metileno, técnica que permite diferenciar células vivas de células muertas. El cálculo se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Viabilidad (\%)} = (\text{Células vivas} / (\text{Células vivas} + \text{Células muertas})) \times 100$$

6.1.7 Cálculo del volumen de inoculación

El cálculo del volumen de inoculación se realizó con base en la metodología descrita por Chris White y Jamil Zainasheff en el libro *Yeast: The Practical Guide to Beer Fermentation*.

- Primero, se calcularon las células necesarias: $\text{Células necesarias} = \text{Pitch rate de } 10^6 \times \text{Volumen en mL} \times \text{°P}$
- Luego, se determinó el volumen de slurry: $\text{Volumen de slurry (L)} = \text{Células necesarias} / \text{Concentración celular}$
- Finalmente, se convirtió a mililitros: $\text{Volumen de slurry (mL)} = \text{Volumen de slurry (L)} \times 1000$

6.2 Parámetros del estilo American Pale Ale (BJCP 18B)

Con el fin de establecer un marco de referencia para la evaluación del proceso fermentativo y del producto final, se consideraron los parámetros establecidos por el Beer Judge Certification Program (BJCP) para el estilo American Pale Ale (18B). Estos lineamientos permiten definir las características esperadas en términos de apariencia, aroma, sabor y propiedades fisicoquímicas, facilitando la comparación entre los resultados obtenidos y los estándares del estilo.

En el Cuadro 6 se presentan los principales parámetros que definen este estilo cervecero, los cuales sirvieron como base para la interpretación del desempeño de la levadura y la calidad del producto elaborado.

Cuadro 6. Parámetros APA

Parámetro	Descripción / Rango
Impresión general	Cerveza pálida, refrescante y lupulada, con suficiente soporte de malta para mantener equilibrio y facilidad de consumo. Predominio del carácter de lúpulo.
Apariencia	Color dorado pálido a ámbar claro (5–10 SRM). Espuma blanca a blanquecina con buena retención. Generalmente clara, aunque puede presentar ligera turbidez si se emplea dry hopping.
Aroma	Lúpulo moderado a intenso (cítrico, floral, resinoso, frutal, tropical, entre otros). Malta de baja a moderada. Ésteres frutales moderados a nulos.

Sabor	Sabor a lúpulo moderado a alto. Malta de apoyo limpia, con posible presencia ligera de notas a pan o tostado. Final medio a seco, sin asperezas.
Sensación en boca	Cuerpo medio-ligero a medio. Carbonatación moderada a alta. Final suave.
IBU	30 – 50
SRM	5 – 10
Densidad original (OG)	1.045 – 1.060
Densidad final (FG)	1.010 – 1.015
Contenido alcohólico	4.5 % – 6.2 % v/v

Adaptado de *Beer Judge Certification Program (2021). BJCP Style Guidelines, Categoría 18B –*

American Pale Ale.

6.3 Proceso de toma y conteo de levaduras

Con el objetivo de determinar la concentración y viabilidad celular de la levadura utilizada, se llevó a cabo el proceso de toma y conteo de levaduras. Este procedimiento se empleó en las reutilizaciones realizadas. El análisis permitió establecer la cantidad adecuada de inóculo para las fermentaciones posteriores, garantizando un control adecuado del proceso fermentativo.

6.3.1 Preparación previa al análisis

Previo al inicio del procedimiento, se desinfectó el área de trabajo del laboratorio utilizando alcohol, con el fin de asegurar condiciones higiénicas y evitar contaminación cruzada. Asimismo, se verificó que la levadura hubiera sedimentado completamente en el fermentador. El conteo celular se realizó preferiblemente un día antes del *brew day*, garantizando así la obtención de datos frescos y una dosificación precisa.

6.3.2 Recolección de muestra desde el fermentador

Equipo utilizado:

- Recipiente de recolección (50 mL)
- Alcohol para desinfección

Procedimiento:

Se verificó que el área se encontrara limpia y libre de objetos que pudieran contaminar la muestra. Posteriormente, se desinfectó la válvula del fermentador con alcohol y se procedió

a su apertura. Se descartaron los primeros segundos de flujo y luego se recolectaron 50 mL de muestra en un recipiente limpio. Finalmente, se cerró la válvula.

6.3.3 Análisis en laboratorio

Materiales y equipos utilizados:

- 3 pipetas plásticas
- Pipeta automática con puntas desechables
- Vaso medidor o beaker
- Frasco volumétrico (100 mL)
- Tubo cónico
- Azul de metileno diluido
- Agua destilada
- Cámara Neubauer y cubreobjetos
- Microscopio Labomed LX400 (Anexo A-6).
- Termómetro
- Medidor de pH Milwaukee MW102 (Anexo A-7)

6.3.4 Procedimiento

Se midieron la temperatura y el pH de la muestra de levadura. Posteriormente, se tomó 1 mL de levadura con una pipeta plástica y se diluyó en agua destilada en un frasco volumétrico, obteniendo una dilución 1:100. Luego, se preparó una dilución de azul de metileno 1:10.

En un tubo cónico, se mezclaron 1 mL de la levadura diluida y 1 mL de la solución de azul de metileno. A continuación, se tomó una alícuota de esta mezcla con una pipeta automática utilizando una punta desechable y se colocó cuidadosamente en la cámara de Neubauer, evitando la formación de burbujas (Anexo A-8). La muestra se cubrió con un cubreobjetos y se observó en el microscopio utilizando el objetivo de 40× (Anexo A-9).

6.3.5 Observación microscópica

Se enfocó correctamente el microscopio y se verificó la adecuada visualización de las líneas de la cámara de Neubauer (hemocitómetro). Posteriormente, se observaron los cuadrantes 1, 3, 5, 7 y 9, y se tomaron fotografías claras de cada uno para su análisis.

6.3.6 Conteo celular

Se realizó el conteo celular diferenciando entre levaduras vivas y muertas. Las levaduras vivas se identificaron por presentar un color celeste claro o ser incoloras, mientras que las levaduras muertas se observaron con una coloración azul oscuro.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Lote de inicio

Con el propósito de evaluar el comportamiento fermentativo de la levadura y la evolución de los parámetros fisicoquímicos del mosto, se realizó un seguimiento diario durante las etapas de fermentación y post-fermentación. Se registraron variables como °Brix (°Plato), gravedad específica (SG), temperatura y pH, las cuales permitieron analizar el comportamiento de fermentación y el estado metabólico de la levadura.

El monitoreo se llevó a cabo desde el momento de la inoculación hasta la etapa de maduración en frío y filtración, permitiendo identificar las diferentes fases del proceso, incluyendo fermentación activa, atenuación final, descanso de diacetilo y enfriamiento progresivo. En el Cuadro 7 se presentan los datos obtenidos durante este seguimiento, los cuales reflejan la evolución del proceso fermentativo y la estabilización del producto final.

Cuadro 7. Fermentación y Post-Fermentación (APA)

Día	°Brix (°P)	SG	Temp (°C)	pH	Etapas
0	12.0	1.048	19	5.3	Inoculación
1	10.5	1.042	19	5.0	Inicio fermentación
2	8.2	1.033	20	4.7	Fermentación vigorosa
3	5.6	1.022	20	4.4	Alta actividad metabólica
4	3.8	1.015	20	4.2	Disminución actividad
5	3.0	1.012	20	4.1	Atenuación final
6	3.0	1.012	21	4.1	Descanso de diacetilo
7	3.0	1.012	21	4.1	Limpieza metabólica
8	3.0	1.012	15	4.1	Inicio enfriamiento
9	3.0	1.012	8	4.1	Enfriamiento progresivo
10	3.0	1.012	4	4.1	Maduración en frío
11	3.0	1.012	4	4.1	Filtración

Elaborado con base en datos de la investigación.

7.2 Evaluación del lote inicial

7.2.1 Atenuación aparente

Para el lote evaluado, la atenuación aparente se calculó a partir de la densidad original (12 °P) y la densidad final (3 °P), obteniéndose un **valor de 75 %**. La atenuación aparente es el porcentaje de azúcares fermentables consumidos por la levadura, estimado a partir de la

diferencia entre la densidad inicial y final. Este resultado indica un desempeño fermentativo adecuado, coherente con los valores esperados para una levadura tipo Ale.

7.2.2 Contenido alcohólico

El contenido alcohólico estimado fue de:

$$ABV \approx 4.7 \% \text{ v/v}$$

Este valor se encuentra dentro del rango típico para el estilo American Pale Ale, indicando una fermentación eficiente.

7.2.3 Análisis comparativo con BJCP 18B

Los parámetros obtenidos fueron comparados con los rangos establecidos por el BJCP para el estilo American Pale Ale.

- **Densidad original (OG):** 1.048 SG → dentro del rango (1.045 – 1.060)
- **Densidad final (FG):** 1.012 SG → dentro del rango (1.010 – 1.015)
- **Contenido alcohólico:** 4.7 % → dentro del rango (4.5 – 6.2 %)

Adicionalmente, el pH presentó una disminución desde 5.3 hasta 4.1, comportamiento característico de una fermentación saludable.

En términos generales, los resultados obtenidos se encuentran dentro de los parámetros definidos para el estilo, evidenciando un proceso fermentativo estable y adecuado.

7.2.4 Concentración celular

Para determinar la concentración celular de la muestra de levadura se utilizó la fórmula estándar empleada en recuentos con cámara de Neubauer: células/mL = (número de células contadas $\times$ 5 $\times$ factor de dilución $\times$ 10^4).

En este caso, el número de células contadas fue 245, el factor de dilución 200, el valor 5 corresponde al número de cuadrantes considerados y 10^4 al factor de conversión del volumen de la cámara. Al sustituir los valores en la fórmula ($245 \times 5 \times 200 \times 10^4$), se obtuvo 2,450,000,000. Por lo tanto, la concentración celular estimada fue de **2.45×10^9 células/mL en la muestra de slurry de levadura.**

7.2.5 Viabilidad celular

Los resultados del conteo fueron:

- Células vivas: 239

- Células muertas: 6

Viabilidad = 97.55 %

Este resultado indica una alta proporción de células viables, adecuada para procesos de reutilización.

7.2.6 Volumen de inoculación

El cálculo del volumen de inoculación se realizó con base en la metodología descrita por Chris White y Jamil Zainasheff en el libro *Yeast: The Practical Guide to Beer Fermentation*, la cual establece la relación entre la tasa de inoculación, la concentración celular y el volumen de mosto a fermentar. Para determinar el volumen de slurry necesario para la inoculación del mosto, se utilizó una tasa de inoculación estándar de 1×10^6 células/mL/°P, comúnmente empleada en fermentaciones cerveceras tipo Ale.

Es importante aclarar que la tasa de inoculación y el volumen de inoculación no son conceptos equivalentes. La tasa de inoculación corresponde a la cantidad de células requeridas por mililitro de mosto y por grado Plato (células/mL/°P), mientras que el volumen de inoculación es el volumen de slurry que debe adicionarse para alcanzar dicha tasa, el cual se calcula en función de la concentración celular de la levadura.

El procedimiento para determinar el volumen de inoculación se desarrolló en tres etapas: En primer lugar, se calcularon las células necesarias utilizando la expresión:

células necesarias = pitch rate $\times$ volumen $\times$ °P.

Al sustituir los valores correspondientes ($1,000,000$ células/mL/°P $\times$ $20,000$ mL $\times$ 12 °P), se obtuvo un total de $240,000,000,000$ células, es decir, 2.4×10^{11} células requeridas para la fermentación.

Posteriormente, se determinó el volumen de slurry necesario en función de la concentración celular obtenida, aplicando la relación:

volumen de slurry (L) = células necesarias / concentración celular.

Al sustituir los valores ($240,000,000,000 / 2,450,000,000$), se obtuvo un volumen de 0.098 L.

Finalmente, este valor se convirtió a mililitros, resultando en 98 mL de slurry. Por lo tanto, el volumen estimado de slurry necesario para inocular 20 L de mosto a 12 °P fue aproximadamente **98 mL**, lo cual permite alcanzar la tasa de inoculación establecida.

7.3 Reutilización 1 (R1)

Para la primera reutilización de la levadura (R1), se realizó el seguimiento del proceso fermentativo mediante el registro diario de °Brix, gravedad específica (SG), temperatura y pH. Estos parámetros permitieron observar la evolución de la fermentación y verificar la estabilidad del proceso en comparación con el lote inicial. El monitoreo abarcó desde la inoculación hasta la etapa de filtración, identificando las diferentes fases del proceso, como fermentación activa, atenuación, descanso de diacetilo y maduración en frío. En el Cuadro 8 se presentan los resultados obtenidos, los cuales permiten evidenciar el comportamiento de la levadura durante su primer ciclo de reutilización.

Cuadro 8. Fermentación y Post-Fermentación (APA) R1

Día	°Brix (°P)	SG	Temp (°C)	pH	Etapas
0	12.0	1.048	19	5.3	Inoculación
1	10.3	1.041	19	5.0	Inicio fermentación
2	8.0	1.032	20	4.8	Fermentación vigorosa
3	4.9	1.019	20	4.5	Alta actividad metabólica
4	3.1	1.012	20	4.3	Disminución actividad
5	3.0	1.012	20	4.2	Atenuación final
6	3.0	1.012	21	4.1	Descanso de diacetilo
7	3.0	1.012	21	4.1	Limpieza metabólica
8	3.0	1.012	15	4.1	Inicio enfriamiento
9	3.0	1.012	10	4.1	Enfriamiento progresivo
10	3.0	1.012	5	4.1	Maduración en frío
11	3.0	1.012	4	4.1	Filtración

Elaborado con base en datos de la investigación.

7.3.1 Comportamiento fermentativo

Durante la fermentación se observó una disminución progresiva de la densidad desde 12 °P hasta 3 °P en un periodo de 5 días, manteniéndose estable posteriormente durante la etapa de maduración. El pH descendió de 5.3 a 4.1, mientras que la temperatura se mantuvo dentro del rango de 19 a 21 °C, evidenciando un proceso fermentativo normal.

7.3.2 Concentración celular

En el conteo R1 (Anexo A-10) la concentración celular fue de 2.0×10^9 células/mL

7.3.3 Viabilidad celular

- Células vivas: 198
- Células muertas: 2

Viabilidad = 99 %

7.3.4 Volumen de inoculación

El volumen de slurry requerido para la inoculación de R2 fue de: 121 mL

7.4 Segunda reutilización (R2)

En el Cuadro 9 se presentan los resultados obtenidos, los cuales reflejan el desempeño de la levadura durante su segunda reutilización.

Cuadro 9. Fermentación y Post-Fermentación (APA) R2

Día	°Brix (°P)	SG	Temp (°C)	pH	Etapas
0	12.0	1.048	19	5.3	Inoculación
1	10.2	1.041	19	4.9	Inicio fermentación
2	7.9	1.032	20	4.6	Fermentación vigorosa
3	5.2	1.021	20	4.4	Alta actividad metabólica
4	3.5	1.014	20	4.2	Disminución actividad
5	3.0	1.012	20	4.1	Atenuación final
6	3.0	1.012	21	4.1	Descanso de diacetilo
7	3.0	1.012	21	4.1	Limpieza metabólica
8	3.0	1.012	15	4.1	Inicio enfriamiento
9	3.0	1.012	8	4.1	Enfriamiento progresivo
10	3.0	1.012	4	4.1	Maduración en frío
11	3.0	1.012	4	4.1	Filtración

Elaborado con base en datos de la investigación.

7.4.1 Comportamiento fermentativo

La fermentación presentó un comportamiento similar a la reutilización anterior, alcanzando la atenuación final en aproximadamente 5 días.

7.4.2 Concentración celular

En el conteo R2 (Anexo A-11) la concentración celular fue de 1.8×10^9 células/mL

7.4.3 Viabilidad celular

- Células vivas: 170

- Células muertas: 10

Viabilidad = 94.44 %

7.4.4 Volumen de inoculación

El volumen de slurry requerido para la inoculación de R3 fue de: 141 mL

7.5 Tercera reutilización (R3)

En el cuadro 10 se presentan los resultados correspondientes a la tercera reutilización, los cuales permiten evidenciar cambios en el desempeño de la levadura asociados al número de ciclos de uso.

Cuadro 10. Fermentación y Post-Fermentación (APA) R3

Día	°Brix (°P)	SG	Temp (°C)	pH	Etapas
0	12.0	1.048	19	5.3	Inoculación
1	11.0	1.044	19	5.1	Inicio lento fermentación
2	9.5	1.038	20	4.9	Fermentación moderada
3	7.2	1.029	20	4.6	Actividad metabólica media
4	5.5	1.022	20	4.4	Disminución progresiva
5	4.2	1.017	20	4.3	Fermentación residual
6	3.6	1.015	21	4.2	Atenuación tardía
7	3.2	1.013	21	4.1	Finalización lenta
8	3.0	1.012	21	4.1	Atenuación final
9	3.0	1.012	15	4.1	Inicio enfriamiento
10	3.0	1.012	8	4.1	Enfriamiento
11	3.0	1.012	4	4.1	Maduración
12	3.0	1.012	4	4.1	Filtración

Elaborado con base en datos de la investigación.

7.5.1 Comportamiento fermentativo

En la tercera reutilización se observó una fermentación más lenta en comparación con los ciclos anteriores, alcanzando la atenuación final en aproximadamente 8 días. Este comportamiento sugiere una disminución en la actividad metabólica de la levadura.

7.5.2 Concentración celular

En el conteo R3 (Anexo A-12) la concentración celular fue de 1.52×10^9 células/mL

7.5.3 Viabilidad celular

- Células vivas: 139
- Células muertas: 13

Viabilidad = 91.45 %

7.5.4 Volumen de inoculación

158 mL (utilizado existiese una cuarta reutilización)

7.6 Interpretación

A partir de los resultados obtenidos en el lote inicial y en las tres reutilizaciones de la levadura, se evidenció un comportamiento fermentativo adecuado durante los primeros ciclos, seguido de una disminución progresiva en la eficiencia de la levadura conforme aumentó el número de reutilizaciones. Esta tendencia se resume en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Resumen de parámetros en reutilización de levadura

Reutilización	Viabilidad (%)	Células/mL ($\times 10^9$)	Volumen de inoculación (mL)
Lote inicial	97.55	2.45	98
R1	99.00	2.00	121
R2	94.44	1.80	141
R3	91.45	1.52	158

Elaborado con base en datos de la investigación.

En el lote inicial, la fermentación presentó un comportamiento óptimo, alcanzando la atenuación final en un período aproximado de 5 días, con una viabilidad celular alta (97.55 %) y una concentración elevada de biomasa (2.45×10^9 células/mL). Estos resultados se reflejaron en un proceso estable y dentro de los parámetros esperados para el estilo American Pale Ale.

Durante la primera reutilización (R1), el comportamiento de la levadura se mantuvo prácticamente sin cambios significativos, evidenciando un comportamiento de fermentación similar y una viabilidad incluso superior (99 %). Sin embargo, se observó una ligera disminución en la concentración celular (2.0×10^9 células/mL), lo que implicó un aumento en el volumen de inoculación requerido.

En la segunda reutilización (R2), aunque la fermentación continuó desarrollándose de manera adecuada, comenzaron a observarse señales iniciales de disminución en el desempeño de la levadura. La viabilidad celular descendió a 94.44 % y la concentración celular a 1.8×10^9 células/mL, manteniéndose aún dentro de rangos aceptables para su uso. El comportamiento fermentativo no presentó variaciones significativas en tiempo de

atenuación, lo que indica que la levadura aún conservaba una actividad metabólica funcional.

Por otro lado, en la tercera reutilización (R3) se evidenció un cambio más marcado en el comportamiento de la levadura. La fermentación presentó un inicio más lento y una prolongación del tiempo necesario para alcanzar la atenuación final (aproximadamente 8 días), lo cual sugiere una disminución en la actividad metabólica. Asimismo, se observó una reducción en la concentración celular (1.52×10^9 células/mL) y en la viabilidad (91.45 %), lo que impactó directamente en la eficiencia del proceso.

En términos generales, se identificó una tendencia decreciente tanto en la concentración celular como en la viabilidad a medida que aumentaron las reutilizaciones, lo cual se tradujo en un incremento progresivo del volumen de inoculación requerido (98 mL $\rightarrow$ 121 mL $\rightarrow$ 141 mL $\rightarrow$ 158 mL). Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura, donde se establece que la levadura pierde vigor fermentativo debido a factores como envejecimiento celular, estrés metabólico y acumulación de subproductos (White & Zainasheff, 2010).

A pesar de esta disminución, la levadura mantuvo un desempeño aceptable hasta la tercera reutilización, logrando completar la fermentación dentro de parámetros adecuados, lo que indica que el manejo y las condiciones de almacenamiento fueron apropiadas.

En conclusión, los resultados obtenidos demuestran que la reutilización de levadura es una estrategia viable hasta al menos tres generaciones, siempre que se mantenga un control adecuado de la viabilidad celular, la concentración y las condiciones de proceso.

7.7 Reducción de costos por reutilización de levadura

La levadura utilizada en el proceso fue SafAle US-05, con un costo unitario de US\$ 4.49 por sachet. En un esquema convencional sin reutilización, se habría requerido un sachet nuevo para cada fermentación. Considerando el lote inicial más las tres reutilizaciones, el costo total proyectado habría sido: $\text{US\$ } 4.49 \times 4 = \text{US\$ } 17.96$

Sin embargo, en el presente estudio se empleó un solo sachet para el lote inicial, del cual se obtuvo el slurry reutilizado en tres fermentaciones consecutivas. Por lo tanto, el costo real incurrido en levadura fue de US\$ 4.49. La diferencia entre el costo proyectado sin

reutilización y el costo real representó un ahorro de: $\text{US\$ } 17.96 - \text{US\$ } 4.49 = \text{US\$ } 13.47$, equivalente a una reducción del 75 % en el costo de levadura, demostrando que la reutilización controlada permitió optimizar los costos de producción sin comprometer la viabilidad celular dentro de los rangos operativos aceptables.

Con el fin de dimensionar el impacto financiero real de esta práctica en un horizonte de producción sostenida, se realizó una proyección basada en una frecuencia de cuatro lotes mensuales. Bajo este esquema, el primer lote de cada mes requiere un sachet nuevo, mientras que los tres lotes restantes operan con la levadura reutilizada, sin costo adicional por este insumo. Esto representa un costo mensual fijo de $\text{US\$ } 4.49$ en levadura, independientemente del volumen de lotes producidos dentro del ciclo.

Proyectado a seis meses, se producirían 24 lotes en total, requiriendo únicamente 6 sachets frente a los 24 que demandaría un esquema sin reutilización. El ahorro acumulado en este período sería de $\text{US\$ } 80.82$, con una reducción del 75 % sobre el costo convencional. Extendiendo el análisis a doce meses, con 48 lotes producidos y solo 12 sachets utilizados, el ahorro acumulado asciende a $\text{US\$ } 161.64$, manteniendo la misma reducción proporcional del 75 %.

Estos resultados evidencian que la reutilización controlada de levadura no representa únicamente un ahorro puntual en la fase experimental, sino un mecanismo de optimización de costos recurrente y escalable, cuyo impacto se consolida progresivamente a lo largo del tiempo de producción.

8 CONCLUSIONES

Se logró evaluar la viabilidad celular y el estado fisiológico del slurry de levadura mediante análisis microscópico, evidenciando valores altos en el lote inicial (97.55 %) y una disminución progresiva hasta la tercera reutilización (91.45 %), lo que permitió determinar su aptitud para ser reutilizada en fermentaciones sucesivas.

Se comprobó que la levadura puede reutilizarse hasta tres generaciones manteniendo un desempeño fermentativo adecuado; sin embargo, a partir de la tercera reutilización se observó una disminución en la actividad metabólica, reflejada en un aumento del tiempo de fermentación y menor eficiencia.

La implementación de un sistema de reutilización de levadura, basado en el control de viabilidad y concentración celular, contribuye a la optimización del proceso productivo y a la reducción de costos, al disminuir la necesidad de levadura seca sin comprometer la calidad microbiológica ni sensorial del producto.

El desarrollo del presente estudio permitió identificar variables críticas de control cuya gestión adecuada resultó determinante para el éxito del proceso. La temperatura de fermentación debe mantenerse entre 19 y 21 °C, ya que desviaciones fuera de este rango, combinadas con el desgaste natural de la levadura por generaciones, pueden comprometer la atenuación y el perfil sensorial del producto. Asimismo, la sanitización rigurosa en cada cosecha de slurry es indispensable, dado que cualquier contaminación introducida en una generación se transfiere y acumula en las siguientes, representando un riesgo creciente conforme aumenta el número de reutilizaciones.

9 RECOMENDACIONES

Establecer un límite técnico para la reutilización de levadura, considerando como referencia un máximo de tres generaciones, o bien un umbral mínimo de viabilidad celular que garantice un desempeño adecuado, evitando así fermentaciones lentas o ineficientes.

Fortalecer el monitoreo de variables fisicoquímicas durante la fermentación, tales como °Brix, gravedad específica, temperatura y pH, con el propósito de detectar oportunamente desviaciones en el proceso y tomar decisiones correctivas de manera inmediata.

Capacitar al personal operativo en técnicas de conteo celular y evaluación de viabilidad, con el fin de asegurar la correcta aplicación del método implementado y mejorar la toma de decisiones en el proceso productivo.

Continuar evaluando el comportamiento de la levadura en generaciones adicionales bajo condiciones controladas, con el fin de determinar con mayor precisión el límite máximo de reutilización sin afectar la calidad del producto.

Integrar el control de reutilización de levadura como parte del sistema de aseguramiento de calidad de la empresa, permitiendo optimizar costos de producción y garantizar la consistencia del producto en cada lote elaborado.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Beer Judge Certification Program.* (2021). Bjcp.org.
<https://www.bjcp.org/style/2015/18/18B/american-pale-ale/>
- Fermentis. (2026). *SafAle™ US-05*. <https://fermentis.com/es/producto/safale-us-05/>
- Google Maps. (2026). Cadejo Brewing Company, Zona Rosa [Mapa]. Google.
<https://www.google.com/maps/place/Cadejo+Brewing+Company+%E2%80%A2+Zona+Rosa/>
- Layfield, J. B., & Sheppard, J. D. (2015). What brewers should know about viability, vitality, and overall brewing fitness: A mini-review. *MBA Technical Quarterly*, 52(3), 132–140. <https://doi.org/10.1094/TQ-52-3-0719-01>
- Lodolo, E. J., Kock, J. L. F., Axcell, B. C., & Brooks, M. (2008). The yeast *Saccharomyces cerevisiae* – the main character in beer brewing. *FEMS Yeast Research*, 8(7), 1018–1036. <https://doi.org/10.1111/j.1567-1364.2008.00433.x>
- Raihofer, L., Zarnow, M., Gastl, M., & Hutzler, M. (2022). A short history of beer brewing: Alcoholic fermentation and yeast technology over time. *EMBO Reports*, 23(12), e56355. <https://doi.org/10.15252/embr.202256355>
- Secretaría de Cultura de la Nación. (2019, 22 de julio). *Historia de la cerveza*. <https://www.cultura.gob.ar/historia-de-la-cerveza-8280/>
- White, C., & Zainasheff, J. (2010). *Yeast: The practical guide to beer fermentation*. Brewers Publications.
- ZEUS IBA. (2020, 12 de junio). *Qué es la levadura: origen e historia de la levadura*. Zeus ES. <https://www.zeusiba.es/que-es-la-levadura/>

11 ANEXOS

A- 1 Molino



A- 2 Tanque de maceración, hervor y centrifugación



A- 3 Fermentadores



A- 4 BBT



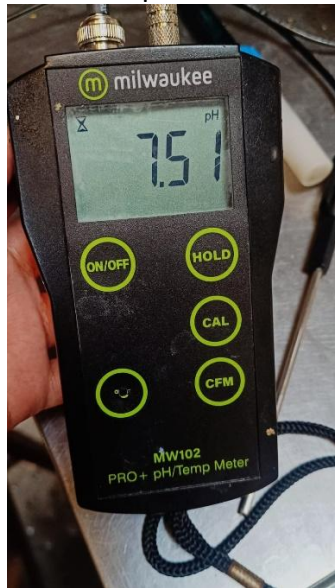
A- 5 Levadura US05



A- 6 Microscopio



A- 7 pH metro



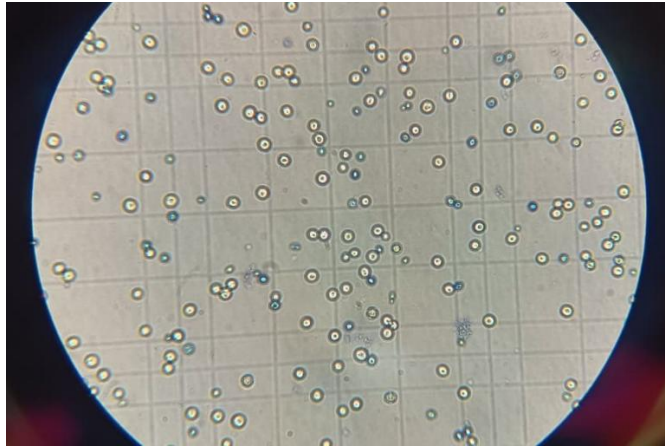
A- 8 Preparación de muestra de levadura diluida



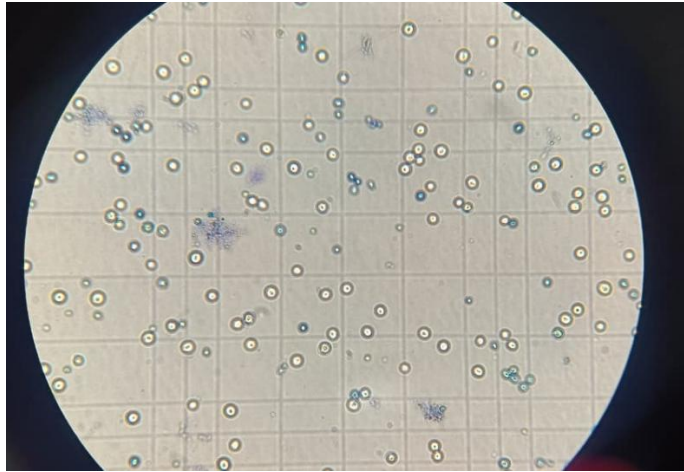
A- 9 Conteo de levadura



A- 10 Células de levadura bajo microscopio R1



A- 11 Células de levadura bajo microscopio R2



A- 12 Células de levadura bajo microscopio R3

