

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**NUEVAS TENDENCIAS DE LEVADURAS VINÍFERAS A NIVEL MUNDIAL Y SU
IMPACTO EN LA INNOVACIÓN DE LAS INDUSTRIAS VITIVINÍCOLAS**

POR

VALENTINA ANAÍS SALAS MORALES

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN – CHILE
2025**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**NUEVAS TENDENCIAS DE LEVADURAS VINÍFERAS A NIVEL MUNDIAL Y SU
IMPACTO EN LA INNOVACIÓN DE LAS INDUSTRIAS VITIVINÍCOLAS**

POR

VALENTINA ANAÍS SALAS MORALES

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN – CHILE
2025**

Aprobada por:

Profesor Asistente, Guillermo Pascual A.
Ing. Agrónomo-Enólogo, Mg. Cs., Dr.

Guía

Profesor Asociado, Macarena Gerding G.
Ing. Agrónomo, PhD.

Asesor

Profesor Asociado, Antonio Pinto R.
Ing. Agrónomo, Ms, PhD.

Asesor

Profesor asociado Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, Mg.Sc.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen.....	1
Summary.....	1
Introducción.....	2
Capítulo 1.....	7
Capítulo 2.....	10
Capítulo 3.....	15
Conclusión.....	26
Referencias.....	27

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Metabolismo de los azúcares, aminoácidos y azufre por levaduras durante la vinificación.....	11
Figura 2 Fase de desarrollo de las levaduras durante la fermentación.....	13

NUEVAS TENDENCIAS DE LEVADURAS VINÍFERAS A NIVEL MUNDIAL Y SU IMPACTO EN LA INNOVACIÓN DE LAS INDUSTRIAS VITIVINÍCOLAS

NEW GLOBAL TRENDS IN WINE YEASTS AND THEIR IMPACT ON INNOVATION IN THE WINE INDUSTRY

Palabras claves: Levaduras de vino, levaduras de fermentación, innovación de levaduras, industrias del vino, tendencias de levaduras, levaduras nativas.

RESUMEN

La producción de vino se remonta a la antigüedad y con el avance de la ciencia se comprendió que las levaduras eran las responsables de la fermentación marcando el inicio de la enología moderna en la cual *Saccharomyces cerevisiae* se consolidó como el principal agente por su capacidad de transformar azúcares en etanol bajo condiciones de estrés asegurando procesos estables y de calidad mientras que las levaduras no-*Saccharomyces* antes vistas como contaminantes adquirieron importancia por su aporte en diversidad sensorial reducción del grado alcohólico y expresión del *terroir* en un escenario de cambio climático y nuevas demandas de consumidores en este contexto las fermentaciones mixtas o secuenciales que combinan *S. cerevisiae* con géneros como *Hanseniaspora*, *Lachancea*, *Metschnikowia*, *Pichia*, *Torulaspota* y *Schizosaccharomyces*, se consolidan como herramienta biotecnológica para equilibrar eficiencia productiva y diferenciación aromática además la biotecnología y la ingeniería genética permiten mejorar cepas con mayor tolerancia al estrés ofreciendo soluciones innovadoras y sostenibles que responden a la globalización y a la búsqueda de vinos más frescos complejos y respetuosos con el medio ambiente de esta forma las nuevas tendencias en levaduras redefinen la microbiología enológica y constituyen una base esencial para la competitividad y sostenibilidad de la industria vitivinícola mundial.

SUMMARY

Wine production dates to ancient times, but it was the scientific discovery of yeast as the driving force behind fermentation that marked the beginning of modern

enology, with *Saccharomyces cerevisiae* becoming the dominant species thanks to its efficiency in converting sugars into ethanol under stress conditions and ensuring stable, high-quality processes. In contrast, non-*Saccharomyces* yeasts, once dismissed as contaminants, have gained importance for their ability to enhance sensory diversity, reduce alcohol content, and highlight *terroir* expression, particularly in response to climate change and shifting consumer demands. Mixed or sequential fermentations that combine *S. cerevisiae* with genera such as *Hanseniaspora*, *Lachancea*, *Metschnikowia*, *Pichia*, *Torulaspora* and *Schizosaccharomyces* have emerged as valuable biotechnological tools to balance production efficiency with aromatic complexity. At the same time, advances in biotechnology and genetic engineering have enabled the development of strains with greater stress tolerance, supporting innovation and offering sustainable solutions that address globalization and the growing demand for fresher, more complex, and environmentally friendly wines. In this way, new yeast trends are redefining the role of microbiology in winemaking and have become a cornerstone for the competitiveness and sustainability of the global wine industry.

INTRODUCCIÓN

Los primeros indicios de la elaboración del vino se remontan al Neolítico, con una de las evidencias más antiguas encontradas al norte de Zagros, alrededor del año 5.400 - 5.000 a.C. Esta evidencia se debe a la presencia de sales cálcicas de ácido tartárico encontrados en piezas de cerámica (Rodríguez *et al.*, 2007). El ADN aislado de esta muestra demostró una estrecha relación con el genoma de la levadura moderna (*Saccharomyces cerevisiae*) dentro de un jarro donde posiblemente se realizó el proceso fermentativo de manera espontánea (McGovern *et al.*, 1996). Pasaron aproximadamente 7.000 años antes de comprender que las levaduras eran los microorganismos responsables de la fermentación. En la antigüedad, debido al desconocimiento científico, se asumía que el proceso de la elaboración del vino era un misterio atribuido a fuerzas divinas de los dioses. Gracias a las investigaciones realizadas por Louis Pasteur y otros científicos en el siglo XIX, se descubrió la actividad microbiana, marcando un punto de inflexión

entre la historia y la ciencia. Luego de unos años Müller-Thurgau incluyó el concepto de “fermentación inoculada”, otorgando mejoramientos tanto en calidad y cantidad en la producción de vinos. (Fernández *et al.*, 2010).

Las levaduras se clasifican como hongos unicelulares que se multiplican a través de un proceso vegetativo asexual (González *et al.*, 1997). Estos microorganismos han sido uno de los más utilizados en el área investigativa, a pesar de que en la antigüedad no se tenía conciencia de su participación. A través de los años, se le ha otorgado una alta importancia económica, ya que son responsables de la elaboración de varios alimentos y bebidas consumidas por los humanos (Suárez *et al.*, 2016).

Por otro lado, existe una clasificación diferenciadora entre levaduras autóctonas de la uva y las de usos comerciales. Donde las levaduras autóctonas son aquellas que tradicionalmente producían la fermentación del mosto de manera espontánea, estos microorganismos se denominan levaduras nativas, ya que están presentes en las pieles de las uvas (Barquet *et al.*, 2012). Se debe considerar que las fermentaciones espontáneas realizadas por los microorganismos biológicos nativos logran obtener vinificaciones con baja proliferación de levaduras. Esto se debe principalmente a que estos microorganismos no toleran las condiciones naturales del mosto, aumentando los riesgos en las alteraciones microbiológicas y químicas, aparte de que suelen tener tiempos prolongados en el proceso fermentativo, indicando que estas levaduras nativas son poco eficientes en la fermentación (Santos *et al.*, 2016). Por otro lado, las fermentaciones espontáneas se destacan por la gran variedad de especies y cepas de levaduras que van apareciendo en diferentes etapas del proceso fermentativo, aportando complejidad al vino por medio de sabores y aromas únicos, reflejando caracteres distintivos (Castells *et al.*, 2024). Se considera que el mosto de la uva natural es un ambiente difícil para la proliferación de levaduras. Las grandes industrias vitivinícolas añaden compuestos que generan un medio aún más complicado para el desarrollo de estos microorganismos, produciendo un estrés en el proceso de la fermentación, proporcionando un ambiente anaerobio, ácido y con escasez nutritiva (Parapouli *et al.*, 2020). El proceso fermentativo del mosto se debe realizar bajo condiciones

controladas para garantizar que las levaduras funcionen de manera óptima en su proliferación (Suárez *et al.*, 2016). En comparación con aquella selección de microorganismos nativos, las levaduras comerciales son adecuadas y cruciales para la fermentación del mosto (Urtubia *et al.*, 2023). Es por esto por lo que la elección de las levaduras apropiadas para dicha reacción, son las cepas estándares, siendo las del género *Saccharomyces*, donde particularmente se utilizan *Saccharomyces cerevisiae* y *Saccharomyces bayanus* (Pilco *et al.*, 2023). Estos microorganismos comerciales se consideran altamente valiosos para las industrias vitivinícolas, ya que tiene la capacidad de transformar las azúcares a etanol en un tiempo reducido. Entre sus principales características se destacan por su resistencia frente a diversas condiciones presentes durante la vinificación y por su eficiencia en la proliferación de levaduras, cualidades que contribuyen de manera significativa a la optimización de los procesos enológicos y al fortalecimiento del sector vitivinícola. (Parapouli *et al.*, 2020).

En el proceso fermentativo, estos microorganismos, ya sean *Saccharomyces* o no-*Saccharomyces*, no solo producen alcohol (etanol) y dióxido de carbono, que son los productos principales que se obtienen en la fermentación, por otra parte también generan otro tipo de sustancias en cantidades más bajas, como los ácidos orgánicos que se generan durante la fermentación, como el ácido succínico, láctico y acético. (Calderón *et al.*, 2016). Aunque estos componentes están presentes en baja concentración que casi no influyen organolépticamente como los aromas secundarios que se pueden notar gracias a el proceso fermentativo, no obstante, estos compuestos que se presentan en pequeñas cantidades actúan como precursores de aromas de interés que pueden desarrollarse más tarde en el vino (Villarreal *et al.*, 2022).

Es importante tener en cuenta que la selección de levaduras no solo es el factor primordial para la proliferación de estos microorganismos en el proceso de vinificación, puesto que también se deben considerar las condiciones a las que serán expuestas las levaduras (Villarreal *et al.*, 2022). De esta manera es necesario controlar que la nutrición de los microorganismos se encuentre en equilibrio osmótico para evitar daños celulares. Las temperaturas generalmente varían según

la cepa de levadura, aunque se deben evitar que sean altas, debido a que reducen la biomasa de los microorganismos, por el contrario, las bajas temperaturas generan latencia en las células, es por esto por lo que las temperaturas óptimas generalmente se encuentran entre el rango de 15°C - 25°C (Pilco *et al.*, 2023). La mayoría de las levaduras tienen una ventaja especial, debido a que pueden sobrevivir en medios ácidos, algo que otros microorganismos no logran tolerar. Esto las convierte en una herramienta valiosa en la industria vitivinícola, ya que son capaces de controlar las bacterias no deseadas en el vino. Por eso, se prefieren ambientes ligeramente ácidos, con un pH entre 4,5 y 6,5. Se debe tener en consideración que el alcohol, específicamente el etanol producido por la fermentación, puede inhibir el crecimiento y viabilidad celular, por lo que no se recomienda finalizar la fermentación con un alto contenido alcohólico (Suárez *et al.*, 2016).

Las levaduras no solo juegan un rol fundamental en la fermentación de vinos, sino que también en los alimentos, debido a que son capaces de convertir ingredientes en productos fermentados con características organolépticas únicas, aportando sabores, aromas y texturas distintivas (Vera *et al.*, 2020).

En este sentido, los cambios observados en los patrones de consumo constituyen un desafío de gran relevancia, debido a que está estrechamente relacionado con la evolución que se está generando en el mercado vitivinícola a nivel global. El consumo del vino se está transformando rápidamente debido a diversos factores como la globalización, generando que existan nuevos países productores, el cambio generacional que demanda diversidad de vinos, con características distintivas y el cambio climático que exige una producción y elaboración mucho más sostenible (Zapater *et al.*, 2023).

Es fundamental tener en cuenta que en nuestra sociedad el conocimiento científico y las nuevas tecnologías son derivadas de la investigación biológica, química y de la informática, las cuales permiten entender cómo los microorganismos interactúan en entornos naturales (Zapater *et al.*, 2023). Asimismo, resulta relevante destacar que la biotecnología ha aportado herramientas innovadoras al estudio de la biodiversidad microbiana presente en los procesos fermentativos de

los alimentos (Vera *et al.*, 2020). Estos avances han contribuido significativamente al ámbito enológico, al facilitar la búsqueda de nuevas estrategias orientadas a la mejora e innovación de los productos, en concordancia con las crecientes exigencias de los consumidores. En este contexto, el sector vitivinícola y enológico constituye un ejemplo destacado de cómo el conocimiento científico y el desarrollo tecnológico han evolucionado a lo largo de los siglos. (Zapater *et al.*, 2023).

Considerando los avances tecnológicos en el ámbito de la investigación, junto con los cambios observados en las preferencias de los consumidores, en esta revisión bibliográfica se presentan las nuevas tendencias en el uso de levaduras vínicas a nivel internacional, así como las principales innovaciones desarrolladas en la industria vitivinícola, donde se busca analizar nuevas tendencias y alternativas de levaduras viníferas en las industrias vitivinícolas a nivel mundial.

CAPÍTULOS

Capítulo 1. Levaduras viníferas y su uso en la industria enológica.

Las levaduras son hongos unicelulares eucariotas que, pese a su reducido tamaño, desempeñan un papel esencial en el proceso de vinificación, destacando por su diversidad morfológica, fisiológica y taxonómica. Su forma celular varía entre especies (Mesas *et al.*, 1999) y su tamaño, superior al de las bacterias, alcanza dimensiones de entre 4 y 5 μm de diámetro (Mendoza *et al.*, 2022). Se reproduce asexualmente mediante gemación o fisión (Pilco *et al.*, 2023); sin embargo, en condiciones de escasez de nutrientes, también se pueden reproducir sexualmente y llevar a cabo meiosis como estrategia de adaptación a entornos desfavorables (Haya Alsammar *et al.*, 2020). Las especies del género *Saccharomyces* constituyen el grupo fermentativo por excelencia (López *et al.*, 2022) con una capacidad reproductiva fuertemente vinculada a su cinética de crecimiento, lo que repercute directamente en la calidad del vino (Sánchez *et al.*, 2021). Desde el punto de vista estructural, las levaduras poseen una pared celular robusta formada por β -glucanos, manoproteínas y quitina, que otorgan protección a la célula y posibilitan fenómenos como la floculación o la acción de toxinas killer (García *et al.*, 2023). La membrana plasmática, compuesta por fosfolípidos, esteroides y proteínas, regula el transporte

de solutos, la señalización celular y el anclaje del citoesqueleto, mientras que el citoplasma contiene orgánulos típicos de células eucariotas junto con una red interna de filamentos y microtúbulos (García *et al.*, 2023).

En cuanto a su fisiología, las levaduras son organismos heterótrofos con metabolismo facultativo (Eizaguirre *et al.*, 2019, García *et al.*, 2023), capaces de alternar entre respiración aeróbica y fermentación anaeróbica según la disponibilidad de oxígeno. En condiciones aeróbicas emplean la respiración celular para obtener energía; en ausencia de oxígeno activa la fermentación, proceso en el que se generan metabolitos secundarios que modifican las características organolépticas del mosto (Pierola *et al.*, 2018). El metabolismo comprende una serie de reacciones químicas intracelulares que permiten la síntesis de metabolitos en cantidades precisas para la subsistencia celular. El conocimiento de estos procesos hace posible inducir la sobreproducción de compuestos específicos de interés enológico (Guriz *et al.*, 2018).

En el contexto enológico, las levaduras se agrupan en dos categorías: las del género *Saccharomyces*, con elevado potencial fermentativo, y las no-*Saccharomyces*, de capacidad más limitada (Escribano *et al.*, 2021).

Históricamente, las levaduras han sido fundamentales en la producción de alimentos fermentados gracias a su capacidad para transformar los azúcares del medio en etanol y dióxido de carbono, aportando propiedades sensoriales deseadas (Mendoza *et al.*, 2022). *S. cerevisiae* destaca por su eficiencia en la conversión de azúcares y su tolerancia a condiciones de estrés, como en altas concentraciones de etanol y SO₂. *S. cerevisiae* se adapta eficazmente al entorno fermentativo, considerado su hábitat autóctono, activando mecanismos moleculares que estimulan genes asociados a la supervivencia celular frente al estrés ácido (Miranda *et al.*, 2015; Ochoa *et al.*, 2024). Asimismo, la resistencia de *S. cerevisiae* a elevadas concentraciones de etanol y SO₂ la convierte en una levadura ideal para la vinificación. La identificación y cuantificación de sus poblaciones durante el proceso fermentativo es crucial, ya que su cinética de crecimiento se relaciona directamente con las reacciones bioquímicas y las condiciones operativas que determinan la calidad del vino (Pilco *et al.*, 2023).

En condiciones enológicas favorables, la concentración celular en el mosto puede variar entre 10^3 y más de 10^6 UFC mL⁻¹, según el entorno y las condiciones iniciales del proceso (Lambrechts *et al.*, 2000). La temperatura es un factor determinante, pues afecta la viabilidad celular y la asimilación de nutrientes esenciales como el nitrógeno. Valores moderados favorecen el desarrollo microbiano, mientras que temperaturas superiores a 35 °C, sostenidas más de cinco minutos pueden provocar la muerte celular. A la inversa, descensos excesivos ralentizan el crecimiento microbiano o lo detienen, comprometiendo la continuidad de la fermentación hasta paralizarla por completo (Piérola *et al.*, 2018; García *et al.*, 2023). El rango de tolerancia al pH se sitúa entre 3 y 10, siendo óptimo un entorno ligeramente ácido, entre 4,5 y 6,5 (Suárez *et al.*, 2016). También se ha documentado que un pH cercano a 7 favorece la velocidad de crecimiento y la eficiencia metabólica (García *et al.*, 2023).

Los requerimientos nutricionales esenciales incluyen una concentración de azúcares superior a 20 g L⁻¹, compuestos nitrogenados como el nitrógeno fácilmente asimilable (NFA), en niveles de 140–150 mg L⁻¹, y vitaminas como Tiamina, Biotina y ácido pantoténico, imprescindibles en rutas metabólicas como la descarboxilación del piruvato (Piérola *et al.*, 2018; Mesas *et al.*, 1999). Para asegurar la eficiencia del proceso, es indispensable controlar parámetros como la aireación inicial, el pH y la temperatura, además de corregir deficiencias nutricionales, especialmente cuando el mosto procede de vendimias deterioradas o contaminadas (Mesas *et al.*, 1999; García *et al.*, 2023).

Determinados compuestos, como el etanol y otros alcoholes, pueden alterar la permeabilidad de la membrana celular, dificultando la absorción de nutrientes y afectando la viabilidad de las levaduras (Piérola *et al.*, 2018). La presencia de taninos, pesticidas o dióxido de azufre en concentraciones elevadas también puede inhibir el crecimiento microbiano (Mesas *et al.*, 1999). Asimismo, la competencia con otros microorganismos como bacterias o mohos representa un obstáculo, ya que pueden interferir en la fase inicial del desarrollo levaduriforme, afectando incluso los mecanismos epigenéticos, llegando a paralizar la fermentación (Piérola *et al.*, 2018).

Con el objetivo de superar estas limitaciones, se ha incentivado el uso de inóculos seleccionados, una técnica introducida por Müller-Thurgau en 1890, que se consolidó posteriormente con la aparición de levaduras secas activas (LSA), que permiten una fermentación más controlada y reproducible en entornos industriales (Piérola *et al.*, 2018). Herramientas como la medición de grados Brix permiten estimar el contenido de azúcares del mosto y anticipar su potencial fermentativo (García *et al.*, 2023).

En la elección de cepas, los criterios enológicos consideran atributos como alta eficiencia fermentativa, baja producción de compuestos indeseables (por ejemplo, SO₂ y H₂S), la producción o resistencia al factor killer y la estabilidad frente a condiciones críticas del medio (Miranda *et al.*, 2015). Diversos factores condicionan la eficiencia de la fermentación (Piérola *et al.*, 2018). Desde una perspectiva genética, se han implementado modificaciones en la pared celular para aumentar la tolerancia al estrés osmótico, favoreciendo así la adaptabilidad y desempeño en condiciones enológicas adversas (Ochoa *et al.*, 2024). Además, se ha determinado que la tolerancia al etanol está condicionada por su estructura genética, el entorno y la dosis de biomasa, permitiendo a *Saccharomyces* tolerar hasta un 19 % de etanol, a diferencia de otras especies cuya tolerancia oscila entre el 5 % y el 7 % (Ochoa *et al.*, 2024).

Durante la activación de las levaduras, es recomendable evitar su contacto directo con el mosto para prevenir desequilibrios osmóticos. La hidratación previa es esencial para facilitar la adaptación, especialmente cuando se prevé un incremento progresivo del contenido alcohólico durante la fermentación (Ochoa *et al.*, 2024). Aunque la uva no constituye el hábitat natural de *Saccharomyces*, proporciona un entorno altamente favorable para el metabolismo, gracias a la presencia de nutrientes esenciales como carbono, nitrógeno y oxígeno, necesarios para procesos metabólicos fundamentales como la glucólisis y la biogénesis (Ochoa *et al.*, 2024).

Capítulo 2. Importancia de las levaduras en la industria vinífera.

Este capítulo aborda los principales grupos de microorganismos implicados en la de vinificación, junto con los mecanismos bioquímicos mediante los cuales se producen las distintas transformaciones. Asimismo, se exponen las tendencias actuales en

microbiología enológica, haciendo énfasis en algunas de las técnicas más utilizadas presentes en el vino (Mesas *et al.*, 1999).

La fermentación alcohólica, es un proceso fundamental en la elaboración del vino, que puede realizarse mediante diversos métodos según el tipo de levaduras implicadas y el nivel de control ejercido durante el proceso. Se caracteriza por la intervención sucesiva de distintas especies microbianas, particularmente del género *Saccharomyces*, aunque también pueden participar levaduras no-*Saccharomyces* (Escribano *et al.*, 2021). Las levaduras asporógenas suelen actuar primero, seguidas por las esporógenas, entre las cuales *S. cerevisiae* se posiciona como la especie dominante en gran parte del proceso fermentativo (Mesas *et al.*, 1999).

Existen diversas formas de conducir la fermentación. Una de ellas consiste en utilizar levaduras autóctonas obtenidas directamente de uvas sanas; una vez iniciada la fermentación en una pequeña porción del mosto, esta se emplea como “pie de cuba” para inducir la fermentación en el resto del volumen. Alternativamente, se puede emplear levaduras secas activas (LSA), que requieren rehidratación previa antes de su incorporación mosto (Mesas *et al.*, 1999). De manera general, la fermentación alcohólica se clasifica en dos categorías: natural e industrial (Fabricio *et al.*, 2019). Desde una perspectiva técnica, se distinguen tres modalidades: la fermentación espontánea, basada en la microbiota nativa del mosto y del equipo de bodega, que confiere una tipicidad única al vino; la fermentación dirigida con levaduras secas activas, que aporta previsibilidad y control, aunque a veces en detrimento de la expresión sensorial del vino; y la fermentación con levaduras nativas seleccionadas, que combina la autenticidad del *terroir* con la reproducibilidad técnica del proceso (Fleet *et al.*, 2003).

La conversión del mosto en vino es esencialmente un proceso microbiológico, en el cual las levaduras transforman los azúcares del mosto en etanol, dióxido de carbono y diversos compuestos secundarios. Este proceso comienza con la degradación de la glucosa a piruvato a través de la glucólisis. Posteriormente, en condiciones anaeróbicas, el piruvato se transforma en acetaldehído y CO₂ mediante la enzima piruvato descarboxilasa, y luego en etanol gracias a la acción de la alcohol deshidrogenasa (García *et al.*, 2024). En este contexto, el NADH generado

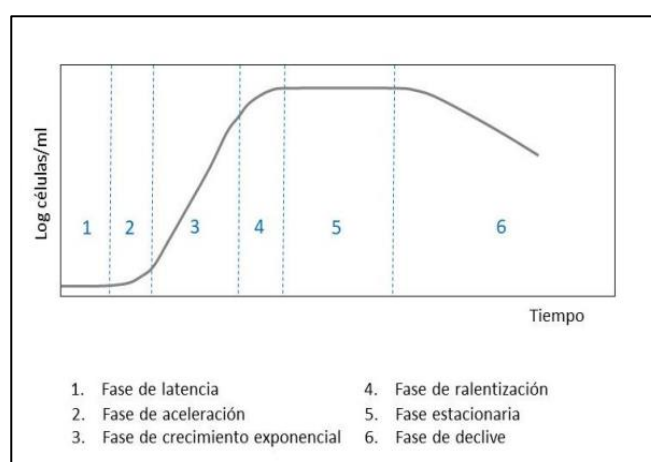
Cada una de estas etapas responde a condiciones ambientales y fisiológicas específicas, afectando directamente la eficiencia y el resultado final del proceso fermentativo (Suárez *et al.*, 1992; Escribano *et al.*, 2021; García *et al.*, 2023). Tras este período, se inicia la fase de aceleración, donde comienza la multiplicación celular, reduciéndose progresivamente el tiempo de generación hasta alcanzar su mínimo (Escribano *et al.*, 2021). Una vez logrado esto, las levaduras entran en la fase de crecimiento exponencial, caracterizada por una división celular acelerada con progresión geométrica. La duración de esta fase depende tanto del tipo de microorganismo como de las condiciones físico-químicas del medio (Suárez *et al.*, 1992; García *et al.*, 2023). Posteriormente se presenta la fase de ralentización, que marca el final del crecimiento exponencial. En esta etapa, las levaduras comienzan a disminuir su ritmo de reproducción debido a la aparición de factores limitantes en el medio (Suárez *et al.*, 1992; Escribano *et al.*, 2021). Esto da paso a la fase estacionaria, que puede durar entre 2 y 10 días, durante la cual la población celular se estabiliza, alcanzando un equilibrio entre proliferaciones y muertes. Esta estabilidad se debe a la reducción de nutrientes y a la acumulación de compuestos tóxicos derivados del metabolismo celular, como el etanol (García *et al.*, 2023). Finalmente, en la fase de declive o muerte, la cantidad de células vivas disminuye de forma abrupta por el agotamiento de nutrientes y el incremento de la toxicidad del medio. En esta etapa, las levaduras comienzan a lisarse (Escribano *et al.*, 2021; García *et al.*, 2023).

El mosto constituye un hábitat microbiano complejo en el que conviven distintas especies de levaduras y bacterias (Piñaga *et al.*, 1995). La evolución de esta microflora impacta directamente en la calidad del vino, por lo que la comprensión de su dinámica resulta crucial (Pilco *et al.*, 2023).

Asimismo, la fermentación genera compuestos secundarios esenciales para el perfil del vino, como glicerol, acetaldehído, ácido acético, ácido succínico, ácido láctico, alcoholes superiores y ésteres. Cada uno de estos compuestos tiene un impacto sensorial relevante, desde la suavidad y cuerpo hasta los aromas característicos del vino (Suárez *et al.*, 1997; Mesas *et al.*, 1999; Escribano *et al.*, 2021;). Entre las levaduras, *S. cerevisiae* se destaca como el microorganismo clave

en la vinificación, no solo por su eficiencia fermentativa, sino también por su capacidad para adaptarse a condiciones adversas como alta concentración de azúcar, pH bajo y estrés osmótico. A pesar de no ser predominante en la uva, se convierte en dominante durante la fermentación gracias a su elevada tolerancia y robustez metabólica (Llanos *et al.*, 2007; Cacho *et al.*, 2012; De Souza *et al.*, 2019; Haya Alsammar *et al.*, 2020; López *et al.*, 2022; García *et al.*, 2023; Ochoa *et al.*, 2024).

Figura 2. Fase de desarrollo de las levaduras durante la fermentación.



Adaptado de Escribano *et al.*, 2021.

La producción de compuestos como el glicerol, los alcoholes superiores, los ácidos orgánicos y los ésteres está fuertemente influenciada por las condiciones fermentativas, tales como temperatura, pH, oxigenación y concentración de nutrientes, así como por la fisiología propia de las levaduras y su respuesta al estrés ambiental (Sánchez *et al.*, 2021; Ochoa *et al.*, 2024). Por ello, existen diversos parámetros que permiten evaluar, controlar y optimizar esta transformación, entre los cuales se destaca el etanol, debido a que su formación es esencial para alcanzar la graduación alcohólica característica del vino y está directamente relacionada con la disponibilidad de azúcares fermentables, predominando la glucosa debido a su afinidad por las levaduras glucófilas (Suarez *et al.*, 2015). El glicerol, en tanto, aparece como el segundo metabolito más abundante tras el etanol, aportando dulzor y densidad en boca, siendo su síntesis condicionada por factor como la

temperatura, el contenido de sulfuroso y el tipo de fermentación ejecutada (Sánchez *et al.*, 2021). Por su parte, los alcoholes superiores, si bien en concentraciones moderadas enriquecen el aroma del vino, en cantidades elevadas comprometen su calidad sensorial, lo cual exige una gestión precisa de las condiciones fermentativas para evitar desviaciones organolépticas (Lambrechts *et al.*, 2000; Suarez *et al.*, 2015). Del mismo modo, los ácidos generados durante el proceso, como el succínico, láctico, pirúvico y acético, configuran el equilibrio ácido del vino, afectando no solo su sabor sino también su estabilidad microbiológica. Cabe destacar que, en un contexto de cambio climático, donde la acidez natural de las uvas tiende a disminuir, se vuelve estratégica la modulación de estos ácidos mediante el diseño fermentativo para mantener el equilibrio gustativo deseado (Sánchez *et al.*, 2021). Los ésteres, por otra parte, emergen como compuestos volátiles clave que otorgan tipicidad aromática al vino, siendo su formación modulada por variables como la temperatura, el oxígeno disuelto y la disponibilidad de nitrógeno fácilmente asimilable (Togores *et al.*, 2010). Asimismo, los polisacáridos, liberados a través de la autólisis celular, no solo enriquecen la textura y persistencia en boca del vino, sino que también interactúan con compuestos fenólicos, influyendo en la percepción de astringencia y la estabilidad del color (Fleet *et al.*, 2003; Suarez *et al.*, 2015). Finalmente, en lo que respecta a los compuestos responsables del color, se ha evidenciado que durante la fermentación se forman pigmentos estables como las vitisinas, cuya presencia y estabilidad están condicionadas por factores como la temperatura, el nivel de sulfuroso, la interacción con metabolitos secundarios y la arquitectura de la pared celular de las levaduras, interviniendo en procesos como la adsorción, reacción y estabilización de antocianos (Suarez *et al.*, 2015; Sánchez *et al.*, 2021).

Capítulo 3. Alternativas y tendencias no convencionales en levaduras viníferas

En los últimos años, la investigación en microbiología enológica ha impulsado el desarrollo de técnicas de selección de cepas con aptitudes específicas, con el objetivo de generar productos fermentados diferenciados (Mendoza *et al.*, 2022). Estos avances han sido especialmente relevantes frente al cambio climático,

permitiendo identificar levaduras silvestres capaces de fermentar en condiciones de estrés sin perder la identidad sensorial de los productos (García *et al.*, 2023). En consecuencia, muchas bodegas han optado por programas de aislamiento de cepas autóctonas, obtenidas del propio ecosistema de los viñedos, dado que estas presentan una mejor adaptación a los mostos locales y a las características ecológicas del entorno. Este enfoque busca potenciar las cualidades típicas de los vinos regionales, evitando la homogeneización del producto y enfrentando retos como la reducción del uso de dióxido de azufre y otros desafíos ambientales (Escribano *et al.*, 2021). Asimismo, se ha promovido la creación de bancos microbianos propios en bodegas tecnológicamente avanzadas, con el fin de preservar la singularidad del *terroir* (Pettrignani *et al.*, 2022).

Las levaduras no convencionales, tradicionalmente consideradas contaminantes, han cobrado relevancia en la biotecnología moderna debido a su capacidad para producir enzimas extracelulares y aportar perfiles aromáticos distintivos en el vino (Lambrechts *et al.*, 2000; De Souza *et al.*, 2019). Se ha demostrado que su uso puede mejorar la calidad del vino, enriquecer la diversidad sensorial e incluso reducir el contenido de etanol mediante rutas fermentativas alternativas como la gliceropirúvica o la respiración celular (Urtubia *et al.*, 2023). Estas levaduras, aunque no completan la fermentación alcohólica por sí solas, participan activamente en las fases iniciales del proceso, influenciando la composición química del producto final (Sánchez *et al.*, 2021). Por ello, la selección de cepas con características deseables se ha convertido en una estrategia clave en la elaboración de levaduras secas activas, como lo demuestran casos exitosos como Lalvin T73 o Maurivin 36 (Piérola *et al.*, 2018).

Además, la variabilidad genética y fenotípica de las levaduras autóctonas, determinada por factores como la variedad de uva, el clima, el suelo y los tratamientos agrícolas, constituye un factor fundamental en su tolerancia al estrés fermentativo y en su contribución a las propiedades sensoriales del vino (Belda *et al.*, 2014; Pettrignani *et al.*, 2022; Ochoa *et al.*, 2024). En este marco, el uso de levaduras no-*Saccharomyces* representa una vía de innovación para responder a la demanda de consumidores que valoran la autenticidad y la diversidad en los

productos fermentados, abriendo nuevas posibilidades tanto en enología como en la elaboración de bebidas artesanales (Miranda *et al.*, 2015; Benito *et al.*, 2018; Velázquez *et al.*, 2022). Este enfoque permite explorar y perfeccionar el producto para satisfacer las expectativas del consumidor contemporáneo (García *et al.*, 2023). Actualmente, la estrategia común para la elaboración de vinos consiste en la inoculación del mosto con cepas seleccionadas de *S. cerevisiae* en formato de levadura seca activa, lo que permite obtener fermentaciones rápidas y reproducibles, pero también genera pérdida de diversidad microbiana y estandarización del producto final (Escribano *et al.*, 2021).

3.1 Impacto según los cambios.

El cambio climático ha impactado significativamente la viticultura, alterando la fenología de la vid, la composición de la uva y la calidad del vino. Uno de los efectos más relevantes es el desfase entre la madurez tecnológica y fenólica, lo que resulta en mostos con alta concentración de azúcar, mayor grado alcohólico y menor acidez, especialmente de ácido málico, afectando negativamente la frescura, estructura y estabilidad del producto final (García *et al.*, 2023). Este fenómeno se ha acentuado en regiones cálidas y del Nuevo Mundo, donde el contenido de etanol en vinos supera en muchos casos el 15 % v/v, lo que perjudica la percepción sensorial y aumenta la carga tributaria en ciertos mercados (Contreras *et al.*, 2014). Durante el proceso de fermentación, aproximadamente el 95 % de los azúcares presentes se transforma en etanol y dióxido de carbono, alrededor del 4 % se convierte en subproductos como el glicerol, que también contribuyen al perfil del vino, y el 1 % restante se incorpora a la biomasa celular (Piérola *et al.*, 2018).

Las variaciones térmicas, el estrés hídrico y la reducción de precipitaciones han alterado la ecología microbiana de la uva, modificando las condiciones del sustrato del mosto, la fisiología de la planta y la biodiversidad del viñedo (García *et al.*, 2023). Estos cambios afectan la síntesis de compuestos aromáticos varietales y reducen la concentración de ácidos, aumentando la producción de azúcares y, en consecuencia, el contenido de etanol (Mira de Orduña *et al.*, 2010). En respuesta a estos desafíos, la industria ha incorporado levaduras no-*Saccharomyces*, como *Lachancea thermotolerans*, *Torulaspota delbrueckii* y *Metschnikowia pulcherrima*,

que permiten reducir el grado alcohólico, mejorar la acidez y el perfil aromático del vino (Sánchez *et al.*, 2021; Sánchez-Suárez *et al.*, 2023). Fermentaciones secuenciales con *S. cerevisiae* y estas especies no-*Saccharomyces* han demostrado resultados positivos, especialmente cuando se emplean estrategias como la adición controlada de oxígeno (Sánchez *et al.*, 2021). En paralelo, se han iniciado investigaciones orientadas a fortalecer la resistencia de las levaduras frente a seis factores de estrés clave que incluyen factores genéticos, nutricionales, de inoculación, mezcla de cepas, tolerancia al alcohol y condiciones de fermentación (Ochoa *et al.*, 2024).

En cuanto a las nuevas generaciones de consumidores, la demanda de vinos con menor graduación alcohólica y perfiles sensoriales innovadores ha crecido, privilegiando vinos blancos, rosados, frutales y de bajo contenido etílico (Piérola *et al.*, 2018). Este cambio en las preferencias ha llevado a replantear la selección de levaduras, prefiriendo aquellas con bajo rendimiento alcohólico y mayor aporte en complejidad aromática (Urtubia *et al.*, 2023). Históricamente, la industria consideraba que las levaduras de mayor desempeño estaban ligadas al *terroir*, sin embargo, los avances en análisis genético han demostrado que es posible obtener vinos de calidad en distintos suelos, siempre que se seleccionen adecuadamente las cepas utilizadas (Piérola *et al.*, 2018).

Si bien muchas bodegas reconocidas mantienen su tradición basada en la singularidad regional, las empresas emergentes recurren cada vez más a levaduras secas activas (LSA) por su estabilidad y previsibilidad. No obstante, esta práctica implica el riesgo de estandarización sensorial. A medida que crece el conocimiento sobre el papel de las levaduras en la fermentación alcohólica, se abren nuevas posibilidades con el uso de combinaciones de cepas *Saccharomyces* y no-*Saccharomyces*. Asimismo, la ingeniería genética ha permitido identificar genes asociados a limitaciones fermentativas, lo cual podría derivar en el desarrollo de cepas específicas para distintos estilos de vino, aunque su aplicación enfrenta restricciones por el rechazo social hacia los organismos genéticamente modificados (Piérola *et al.*, 2018).

En el contexto de globalización, la industria vitivinícola se enfrenta al desafío de aumentar la producción sin sacrificar la identidad de los vinos regionales. La incorporación de nuevas tecnologías ha sido clave para mantener estándares de calidad (Farroñay *et al.*, 2013).

3.2 Tipos de fermentaciones.

Las fermentaciones mixtas han emergido como una estrategia biotecnológica clave para evitar la homogeneización sensorial de los vinos inoculados con cepas comerciales de *S. cerevisiae*, proponiendo el uso de levaduras no-*Saccharomyces* seleccionadas que, en combinación con *S. cerevisiae*, permiten recuperar parte de la complejidad organoléptica de las fermentaciones espontáneas bajo un control más riguroso (Escribano *et al.*, 2021). La combinación de estas levaduras no-*Saccharomyces* con *S. cerevisiae* ha demostrado ser eficaz en la mejora de los perfiles aromáticos del vino, aunque su éxito depende en gran medida de la interacción con la microbiota autóctona, la cual puede dificultar la implantación de cepas comerciales, cuando se emplean como levadura seca activa (Romero *et al.*, 2015). Las levaduras no-*Saccharomyces* pueden sintetizar compuestos como ésteres, ácido succínico y acetaldehídos, enriqueciendo así el perfil del vino; sin embargo, su crecimiento descontrolado podría resultar en la liberación de toxinas perjudiciales (Ochoa *et al.*, 2024). Entre los modos de fermentación, se destaca la fermentación secuencial como la más eficiente para preservar la tipicidad sensorial, disminuir la acidez volátil y el contenido alcohólico, y aumentar la producción de glicerol sin perder el aporte aromático de las levaduras no-*Saccharomyces* (García *et al.*, 2015). Esta alternativa, frente a la fermentación espontánea o el uso exclusivo de *S. cerevisiae*, permite aprovechar los beneficios de las no-*Saccharomyces*, aunque suele implicar un retraso en el inicio del proceso fermentativo (Padilla *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016; Benito *et al.*, 2019; Binati *et al.*, 2020). La co-inoculación controlada de no-*Saccharomyces* y *S. cerevisiae* ha sido propuesta como una estrategia emergente que permite mejorar la calidad y seguridad del producto, influenciada por múltiples factores como el tipo de estrategia fermentativa, el tamaño del inóculo, la interacción entre especies y la duración de la actividad metabólica (Escribano *et al.*, 2018; Sánchez *et al.*, 2021).

Gracias al conocimiento avanzado del genoma de las levaduras, ha sido posible desarrollar cepas genéticamente modificadas que optimizan el rendimiento fermentativo y reducen costos de producción (Mendoza *et al.*, 2022). En este contexto, los factores genéticos han adquirido un rol protagónico, permitiendo aumentar la resistencia al estrés y facilitar procesos fermentativos más robustos. Esta mejora se ha logrado a través de técnicas como la hibridación interespecífica y la supresión génica, además de protocolos de inoculación que reduce el estrés osmótico y favorece el desempeño en medios hostiles (Ochoa *et al.*, 2024). La biotecnología ha permitido manipular el metabolismo de estas levaduras, acercando la posibilidad de definir un "genoma mínimo de levadura", lo cual habilitaría aplicaciones más específicas (Mendoza *et al.*, 2022). Mediante la sobreexpresión del gen *ATF1*, por ejemplo, se ha incrementado la síntesis de ésteres y con ello la intensidad de aromas frutales; además de promover la degradación del ácido málico y la producción de ácido láctico, contribuyendo a la estabilización del vino (Lambrechts *et al.*, 2000).

El avance de la microbiología enológica ha dado lugar a nuevas estrategias fermentativas que buscan equilibrar la eficiencia tecnológica con la expresión sensorial del vino. En este contexto, las levaduras utilizadas como iniciadoras del proceso fermentativo, también llamadas *starter*, pueden ser de origen comercial o autóctono. Las cepas comerciales destacan por su alta eficiencia, rapidez cinética y resistencia a condiciones adversas, permitiendo un control microbiológico estricto. No obstante, su uso masivo ha sido criticado por contribuir a la homogeneización del perfil organoléptico, motivo por el cual muchas bodegas se inclinan por la utilización de cepas nativas previamente seleccionadas (García *et al.*, 2023).

Entre las metas que de su aplicación, destacan una mayor acidez, intensificación de los compuestos aromáticos y fenólicos, así como una disminución de los niveles de etanol. Aunque existen tecnologías físicas para lograr estos fines, como la nanofiltración, la ósmosis inversa o la criomaceración, el empleo de estas levaduras representa una alternativa biológica efectiva y sustentable (Sánchez-Suárez *et al.*, 2023).

El comportamiento de estas levaduras depende de factores ambientales y nutricionales, por lo que su abundancia relativa y su impacto fermentativo varían a lo largo del proceso. Generalmente predominan en las etapas iniciales, donde su baja tolerancia al etanol limita su acción conforme avanza la fermentación (García *et al.*, 2023). Su metabolismo incompleto de azúcares impide que finalicen solas el proceso fermentativo, por lo que deben ser utilizadas junto a levaduras convencionales. Sin embargo, algunas especies que no-*Saccharomyces* pueden reducir el contenido alcohólico entre un 1 y 2 % v/v, especialmente cuando presentan un bajo rendimiento etanogénico y consumen una cantidad significativa de azúcares (Contreras *et al.*, 2014; Röcker *et al.*, 2016).

Históricamente consideradas contaminantes, hoy estas levaduras son reconocidas por su capacidad de aportar diversidad aromática, mejorar la textura y reducir el nivel de alcohol, el glicerol, ciertos pigmentos fenólicos y ácidos orgánicos, además de liberar manoproteínas y polisacáridos beneficiosos (Fleet *et al.*, 2003; Binati *et al.*, 2020). No obstante, su uso exclusivo presenta riesgos como paradas fermentativas o la generación de compuestos indeseables si no se acompaña con un control adecuado del pH y nutrientes disponibles (Di Maro *et al.*, 2007; Manzanares *et al.*, 2011).

La aplicación efectiva de estas levaduras requiere comprender su cinética de crecimiento, su interacción con otras especies y su resistencia a factores como el etanol, el pH o la disponibilidad de nitrógeno. Su implementación se ha facilitado gracias a la caracterización de cepas con baja producción de etanol y alta compatibilidad fermentativa. Su selección se basa en parámetros como la tolerancia al estrés, la dinámica metabólica y su potencial sensorial (Sánchez *et al.*, 2021; Ochoa *et al.*, 2024).

Finalmente, se ha identificado una notable diversidad microbiana asociada a distintas variedades de uva en múltiples regiones, lo cual sustenta el concepto de *terroir* microbiano y la unicidad de cada vino (Piérola *et al.*, 2018).

3.3 Tipos de levaduras no-*Saccharomyces*.

Dentro de los géneros de levaduras no pertenecientes a *Saccharomyces*, destaca el género *Cándida*, reconocido por su carácter fructífero (Fleet *et al.*, 2003) y por su

capacidad para producir glicerol y ciertos alcoholes superiores (Sánchez *et al.*, 2021; Ochoa *et al.*, 2024). Esta levadura ha sido empleada en fermentaciones mixtas con el objetivo de reducir el contenido de etanol, manteniendo niveles aceptables de acidez, aunque presenta un bajo poder fermentativo y suele generar alta acidez volátil (Sánchez *et al.*, 2021; García *et al.*, 2023). Además, *Cándida* es capaz de formar ésteres y producir acetato de etilo, compuestos que influyen positivamente en el perfil aromático del vino (Sánchez *et al.*, 2021). Su presencia se asocia con mostos provenientes de uvas afectadas por podredumbre, lo que aumenta el riesgo de formación de compuestos no deseados (Mesas *et al.*, 1999; Guriz *et al.*, 2018). A pesar de su baja tolerancia al etanol (Fleet *et al.*, 2003; Manzanares *et al.*, 2011; Röcker *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016; Benito *et al.*, 2019), estas levaduras pueden mantenerse activas hasta el final del proceso fermentativo si se controlan adecuadamente variables como la temperatura, contribuyendo así a la complejidad aromática del vino (Di Maro *et al.*, 2007).

El género *Hanseniaspora* se caracteriza por su participación predominante en las fases iniciales de la fermentación, debido a su baja tolerancia al etanol (García *et al.*, 2023) y su escasa resistencia frente a otros alcoholes (Manzanares *et al.*, 2011; Röcker *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016; Benito *et al.*, 2019). Estas levaduras poseen una alta actividad β -glucosidasa, lo que favorece la liberación de compuestos aromáticos varietales, incrementando la complejidad sensorial del vino (Sánchez *et al.*, 2021). Además, presentan un metabolismo con efecto Crabtree negativo, lo que implica que bajo condiciones aerobias la glucosa se metaboliza hacia compuestos no etanólicos en lugar de etanol, contribuyendo así a una reducción del contenido alcohólico sin un aumento significativo de la acidez (Sánchez *et al.*, 2021). También se ha observado que producen elevadas cantidades de glicerol, compuestos volátiles y ésteres, lo cual repercute positivamente en la calidad organoléptica del vino (Sánchez *et al.*, 2021; García *et al.*, 2023), así como un aumento en la producción de ácido succínico (Sánchez *et al.*, 2021). No obstante, *Hanseniaspora* exhibe una baja actividad fermentativa (Escribano *et al.*, 2021), y en fermentaciones puras tiende a generar altas concentraciones de ácido acético, lo que limita su aplicación exclusiva (Sánchez *et al.*, 2021). Otro aspecto distintivo es su baja

síntesis de alcoholes superiores, lo cual puede ser deseable para ciertos perfiles aromáticos más delicados (Sánchez *et al.*, 2021).

El género *Lachancea* resulta ampliamente valorado en enología por su capacidad para incrementar la acidez total del vino mediante la producción significativa de ácido láctico (Sánchez *et al.*, 2021). Esta característica permite mejorar la frescura sensorial del producto final y ajustar su equilibrio ácido en zonas cálidas o vendimias adelantadas. Además, destaca por su habilidad para generar ésteres frutales, entre ellos el acetato de etilo, lo que contribuye positivamente al perfil aromático del vino (Sánchez *et al.*, 2021). En términos fermentativos, *Lachancea* ha demostrado reducida producción de alcohol en comparación con *S. cerevisiae*, tanto respecto al volumen final como a la menor eficiencia en la conversión de azúcares (Aplin *et al.*, 2019; Sánchez *et al.*, 2021), lo que la posiciona como una herramienta útil para reducir el contenido alcohólico sin comprometer la calidad. Adicionalmente, presenta una moderada tolerancia al etanol (Manzanares *et al.*, 2011; Röcker *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016; Benito *et al.*, 2019) y una destacada capacidad de liberar polisacáridos, lo cual favorece la estabilidad coloidal y la untuosidad en boca (Sánchez *et al.*, 2021). Aunque en determinadas condiciones su participación puede estar asociada a una reducción en la acumulación de pigmentos fenólicos, también se ha observado que promueve la acumulación de polifenoles y la formación de compuestos aromáticos florales como el 2-feniletanol (Sánchez *et al.*, 2021).

El género *Metschnikowia* destaca por producir elevados niveles de glicerol, polisacáridos y compuestos aromáticos como el 2-feniletanol y el acetato de isoamilo (Sánchez *et al.*, 2021). Esta levadura incrementa la producción de ésteres y otros compuestos aromáticos volátiles que enriquecen el perfil sensorial del vino (Sánchez *et al.*, 2021), además de favorecer la estabilidad cromática mediante la formación de pigmentos como la vitisina A (Sánchez *et al.*, 2021). Su metabolismo exhibe efecto Crabtree negativo, lo que implica que en condiciones aerobias canaliza la glucosa hacia vías respiratorias en lugar de fermentativas, contribuyendo así a una reducción del contenido de etanol en el producto final (Aplin *et al.*, 2019; Sánchez *et al.*, 2021). Asimismo, *Metschnikowia* aumenta la acidez total del vino, destacando la producción de ácido succínico, mientras que en fermentaciones

mixtas disminuye el ácido acético (Sánchez *et al.*, 2021). Sin embargo, cuando fermenta en condiciones desfavorables, puede generar cantidades elevadas de ácido acético, ácidos volátiles, diacetilo y alcoholes superiores, lo que representa una limitación para su uso exclusivo (Sánchez *et al.*, 2021; García *et al.*, 2023). A pesar de ello, en co-inoculación con *S. cerevisiae*, *M. pulcherrima* no solo reduce la acidez volátil, sino que también mejora la liberación de compuestos aromáticos y polifenoles totales, consolidándose como una levadura con alto potencial enológico (Sánchez *et al.*, 2021).

El género *Pichia* destaca por su capacidad de generar ésteres afrutados y mejorar el perfil aromático varietal de los vinos (Sánchez *et al.*, 2021). Esta levadura posee alta actividad β -glucosidasa, la cual facilita la liberación de terpenos y compuestos aromáticos, y presenta también gran capacidad para liberar polisacáridos, lo que repercute en mayor estabilidad coloidal y sensación en boca (Sánchez *et al.*, 2021). Asimismo, contribuye a la reducción del contenido alcohólico en fermentaciones secuenciales (Aplin *et al.*, 2019). En fermentaciones secuenciales, ciertas especies del género han demostrado una notable actividad HCDC, lo que favorece la formación de pigmentos estables como las piranoantocianinas vinilfenólicas, impactando positivamente en la intensidad y estabilidad del color. Sin embargo, *Pichia* también puede presentar limitaciones en su aplicación, ya que algunas especies están asociadas a la formación de compuestos fenólicos volátiles indeseables, como el 4-etilfenol, que afectan negativamente el perfil sensorial del vino (Sánchez *et al.*, 2021). Además, su baja tolerancia al etanol y su escaso poder fermentativo restringen a fases iniciales de fermentación (García *et al.*, 2023). Otro aspecto relevante es su elevada producción de acetato de etilo, compuesto que, en niveles moderados, puede aportar aromas frutales agradables, pero que en concentraciones excesivas genera defectos sensoriales (Sánchez *et al.*, 2021).

El género *Schizosaccharomyces* se caracteriza por desacidificar el mosto mediante la degradación eficiente del ácido málico, lo que permite ajustar la acidez del vino final y equilibrar su perfil gustativo (Sánchez *et al.*, 2021). Esta levadura también produce elevados niveles de ácido pirúvico, un compuesto clave en la síntesis de vitisina A, contribuyendo de notablemente a la estabilidad cromática del

vino (Sánchez *et al.*, 2021). Además, se ha reportado que incrementa considerablemente la producción de polisacáridos y glicerol en comparación con *S. cerevisiae*, mejorando así la textura y el volumen en boca (Sánchez *et al.*, 2021). Asimismo, *S. pombe* incrementa la producción de polifenoles totales y antocianos vinilfenólicos, potenciando la intensidad y persistencia del color en el vino (Contreras *et al.*, 2014; Sánchez *et al.*, 2021). Sin embargo, desventajas, entre ellas la producción de ácido acético y ácido volátil en concentraciones significativas si no se controlan adecuadamente las condiciones fermentativas, así como una mayor producción de acetaldehído, que puede influir en el aroma final del producto (Sánchez *et al.*, 2021).

Finalmente, el género *Torulaspota* resalta por su elevada producción de polisacáridos, su capacidad para reducir el contenido de etanol y su contribución al aumento de glicerol, lo cual favorece la untuosidad y el volumen en boca del vino (Mesas *et al.*, 1999; Guriz *et al.*, 2018; Sánchez *et al.*, 2021). Esta levadura mejora el perfil aromático a través de la síntesis de ésteres, así como de compuestos volátiles como el 2-feniletanol y el acetato de etilo, asociados a notas florales y afrutadas de alta calidad sensorial (Sánchez *et al.*, 2021). Su vía gliceropirúvica favorece altos niveles de glicerol, junto con reducir los niveles de acetaldehído y vitisina B, favoreciendo fermentaciones más limpias y con menor riesgo de defectos aromáticos (Sánchez *et al.*, 2021). Asimismo, presenta una producción generalmente baja o moderada de ácido acético, junto con un incremento de ácido succínico y una reducción de la acidez volátil, lo cual mejora el equilibrio del vino (Sánchez *et al.*, 2021). También incrementa las antocianinas y flavanoles, además de participar en la formación de compuestos estabilizantes del color como las vitisinas (Sánchez *et al.*, 2021). A nivel enzimático, se ha identificado alta actividad de pectinasa y amilasa, facilitando la liberación de precursores aromáticos a partir de los metabolitos varietales. Aunque su tolerancia al etanol es moderada y no siempre logra completar la fermentación alcohólica en fermentaciones puras, *T. delbrueckii* ha demostrado una mejor capacidad fermentativa que otras levaduras no-*Saccharomyces*, especialmente en esquemas secuenciales o co-inoculados (García *et al.*, 2023).

Además de los géneros ampliamente utilizados en fermentación enológica, existen otras levaduras no-*Saccharomyces* que, si bien poseen menor representación en la literatura científica, presentan características relevantes que justifican su mención. *Zygosaccharomyces* destaca por su capacidad osmofílica y su crecimiento en medios con altas concentraciones de azúcar (Escribano *et al.*, 2021), contribuyendo a la producción de glicerol, ácido succínico y polisacáridos. No obstante, su persistencia en ambientes con etanol y azúcares residuales puede representar un riesgo microbiológico si no se controla adecuadamente (Sánchez *et al.*, 2021; García *et al.*, 2023). El género *Starmarella*, por su parte, se caracteriza por su metabolismo fructófilo y su capacidad de mantenerse activo en fases medias y tardías de fermentación, lo que le permite reducir significativamente el contenido alcohólico del vino y aumentar su acidez total (Sánchez *et al.*, 2021; García *et al.*, 2023). Asimismo, produce poco acetaldehído, sintetiza abundante glicerol y aporta complejidad aromática, aunque su uso debe ser cuidadosamente monitoreado para evitar la formación excesiva de acetato de etilo (Sánchez *et al.*, 2021). *Rhodotorula* presenta elevada actividad β -glucosidasa, favoreciendo la liberación de aromas frutales y florales (Sánchez *et al.*, 2021), aunque también puede producir compuestos fenólicos volátiles indeseados como el 4-etilguaicol. Se trata de una levadura aerobia, de baja tolerancia al etanol, lo que limita su participación a las etapas iniciales de la fermentación (Manzanares *et al.*, 2011; Röcker *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016; Benito *et al.*, 2019; Escribano *et al.*, 2021; García *et al.*, 2023). *Kluyveromyces* es un género con metabolismo respiratorio preferente y efecto Crabtree negativo (Sánchez *et al.*, 2021), cuya relevancia enológica se vincula a su capacidad para liberar compuestos aromáticos sin generar grandes cantidades de etanol. Su fermentación es principalmente aerobia, y aunque su aplicación ha sido más común en productos lácteos, se ha explorado su uso en vinificación como herramienta de reducción de grado alcohólico y mejora del perfil sensorial del vino (Sánchez *et al.*, 2021; García *et al.*, 2023). Finalmente, *Lodderomyces* presenta un comportamiento fermentativo estable y buena tolerancia al etanol, capaz de completar la fermentación alcohólica con baja producción de ácido acético y una

contribución moderada en la formación de ésteres y polisacáridos (Sánchez *et al.*, 2021).

CONCLUSIÓN

A lo largo de la historia de la vinificación las levaduras han demostrado ser agentes esenciales en la transformación del mosto en vino y en la configuración de sus atributos sensoriales, siendo el género *Saccharomyces* en especial *S. cerevisiae* las más utilizadas a nivel mundial. Esto debido a su alta eficiencia fermentativa, su resistencia frente a condiciones adversas, su versatilidad para adaptarse a diferentes estilos enológicos y exigencias productivas, a pesar de que los cambios climáticos que han modificado la fisiología de la vid y la composición de las uvas. Los cambios generacionales han impulsado la demanda de vinos frescos complejos y sostenibles y la globalización ha abierto nuevas preferencias y estilos en el uso de levaduras, lo que se ha convertido en un pilar estratégico para enfrentar los nuevos desafíos mediante investigaciones en microbiología enológica permitido revalorizar a las levaduras no-*Saccharomyces* tradicionalmente consideradas contaminantes pero hoy reconocidas por su capacidad de aportar diferenciación aromática reducción de contenido alcohólico incremento en la acidez y expresión del *terroir*. Aquellos factores otorgan ventajas competitivas en un mercado globalizado, estas especies han sido incorporadas mediante fermentaciones secuenciales o mixtas junto a *S. cerevisiae* demostrando que la combinación de cepas puede enriquecer la complejidad sensorial sin sacrificar eficiencia productiva al mismo tiempo los avances en biotecnología e ingeniería genética han potenciado el desarrollo de cepas más resistentes y adaptadas a condiciones de estrés fermentativo permitiendo responder a los retos actuales de sostenibilidad y calidad en la industria vitivinícola, en este sentido se concluye que las nuevas tendencias en el uso de levaduras representan una oportunidad única para innovar diversificar y fortalecer la competitividad de la industria a nivel mundial sin embargo las levaduras pertenecientes al género *Saccharomyces* mantienen su predominio por su robustez tecnológica, su capacidad de completar la fermentación alcohólica y su versatilidad, consolidándose como el principal recurso microbiano en la producción de vinos y reafirmando que la innovación en la vitivinicultura no consiste en sustituirlas sino en

complementarlas con alternativas emergentes que potencien la calidad y la identidad de los vinos del futuro.

REFERENCIAS

1. Alsammar, H., & Delneri, D. (2020). An update on the diversity, ecology and biogeography of the *Saccharomyces* genus. *FEMS Yeast Research*, 20(3), foaa013. <https://doi.org/10.1093/femsyr/foaa013>
2. Aplin, J. J., White, K. P., & Edwards, C. G. (2019). Growth and metabolism of non-*Saccharomyces* yeasts isolated from Washington state vineyards in media and high sugar grape musts. *Food Microbiology*, 77, 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.09.004>
3. Barquet, M. (2012). Ingeniería metabólica en *Saccharomyces cerevisiae* y estudio de levaduras nativas productoras de aromas isoprenoides. Tesis de maestría. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Química. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/2667>
4. Belda, I., Navascués, E., Alonso, A., Marquina, D., & Santos, A. (2014). Microbiología del proceso de vinificación: selección de levaduras *Saccharomyces cerevisiae* autóctonas con óptimas propiedades enológicas. *Reduca (Biología)*, 7(1).
5. Benito, S. (2018). The impact of *Torulasporea delbrueckii* yeast in winemaking. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102, 3081–3094. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8849-0>
6. Binati, R. L., Lemos Junior, W. J. F., Luzzini, G., Slaghenaufi, D., Ugliano, M., & Torriani, S. (2020). Contribution of non-*Saccharomyces* yeasts to wine volatile and sensory diversity: A study on *Lachancea thermotolerans*, *Metschnikowia spp.* and *Starmerella bacillaris* strains isolated in Italy. *International Journal of Food Microbiology*, 318, 108470. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2019.108470>
7. Cacho, J. (2012). Conocimientos actuales sobre la hidrólisis de los compuestos glicosídicos en los vinos. *Arômes du vin / Aromas del vino*, (63).
8. Calderón, R. R., Muñoz, O. F., & Flores, J. H. C. (2016). Estudio del consumo de azúcares reductores durante la fermentación alcohólica del mosto de uva Italia para la obtención de vino blanco. *Industrial Data*, 19(2), 104–110. <https://doi.org/10.15381/idata.v19i2.12842>

9. Castells, R. M., García, J. M., Espinosa, J. F., Pacheco, J. C., Suárez, F. S., & Moreno, J. (2024). Una visión general sobre el uso de levaduras secas activas para fermentaciones de vino. En *XLV Jornadas de viticultura y enología de la Tierra de Barros; V Congreso Agroalimentario de Extremadura: Almendralejo, 2 al 5 de mayo de 2023* (pp. 99–111). Centro Universitario Santa Ana.
10. Contreras, A., Hidalgo, C., Henschke, P., Chambers, P., Curtin, C., & Varela, C. (2014). Evaluation of non-*Saccharomyces* yeasts for the reduction of alcohol content in wine. *Applied and Environmental Microbiology*, *80*(5), 1670–1678. <https://doi.org/10.1128/AEM.03780-13>
11. De Piérola, J. G. F. (2018). El papel de la selección de levaduras en la elaboración del vino. *Cuadernos del Tomás*, (10), 169–198. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6573032>
12. De Souza Varize, C., Christofoleti-Furlan, R. M., Muynarsk, E. S. M., de Melo Pereira, G. V., Lopes, L. D., & Basso, L. C. (2019). Biotechnological Applications of Nonconventional Yeasts. En T. Peixoto Basso (Ed.), *Yeasts in Biotechnology*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83035>
13. Di Maro, E., Ercolini, D., & Coppola, S. (2007). Yeast dynamics during spontaneous wine fermentation of the Catalanesca grape. *International Journal of Food Microbiology*, *117*(2), 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.04.007>
14. Eizaguirre, J. I. (2019). *Caracterización y domesticación de cepas naturales de Saccharomyces eubayanus para su aplicación en la industria cervecera* (Tesis doctoral, Universidad Nacional). https://www.researchgate.net/publication/342992452_Caracterizacion_y_domesticacion_de_cepas_naturales_de_para_su_aplicacion_en_la_industria_cervecera
15. Escribano Viana, R. (2021). *Selección de levaduras no-Saccharomyces para la elaboración de vinos tintos de calidad* (Tesis de maestría, Universidad de La Rioja). Universidad de La Rioja. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=300634>
16. Fabricio, C. B. C. (2019). *Efecto fermentativo de cuatro tipos de levadura en un vino a base de grosella y carambola* (Tesis doctoral, Universidad Agraria del Ecuador).
17. Farroñay, Z. I. C. (2013). Léxico del proceso de fabricación de vinos peruanos. *Boletín de la Academia Peruana de la Lengua*, (55), 217–237. <https://doi.org/10.46744/bapl.201301.007>

18. Fernández, J. M. C., & Jiménez, M. E. R. (2010). *El singular mundo de las levaduras enológicas*. Universidad de Cádiz.
19. Fleet, G. H. (2003). Yeast interactions and wine flavour. *International Journal of Food Microbiology*, 86(1–2), 11–22. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(03\)00245-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(03)00245-9)
20. García, M., Esteve-Zarzoso, B., Caballero, J. M. C., Crespo, J., Romero, V., & Arroyo, T. (2015). Inoculación de cepas autóctonas desaccharomyces y no-saccharomyces en vinos de la DO "Vinos de Madrid". En *Enología 2.015: innovación vitivinícola* (pp. 154–157). Publicacions URV. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8877723>
21. González Villa, T., & Vilanova de la Torre, M. D. M. (1997). Aportaciones de la biología molecular y genética a la ecofisiología de levaduras enológicas. *Cadernos da Área de Ciências Agrárias*, 15, 139–153. <https://digital.csic.es/handle/10261/166970>
22. Guriz Panaifo, S. L. (2018). *Microorganismos de uso industrial: vinos, quesos, yogurt, salsa de soja*. Universidad Nacional De La Amazonía Peruana.
23. Lambrechts, M. G., & Pretorius, I. S. (2000). Yeast and its importance to wine aroma. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 21(1), 97–129. <https://doi.org/10.21548/21-1-3560>
24. Liu, P., Lu, L., Duan, C., & Yan, G. (2016). The contribution of indigenous non-Saccharomyces wine yeast to improved aromatic quality of *Cabernet Sauvignon* wines by spontaneous fermentation. *LWT - Food Science and Technology*, 71, 356–363. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.04.031>
25. Llanos Frutos, R. (2007). *Estudio comparativo entre aislados clínicos y no clínicos de S. cerevisiae y su papel como patógeno emergente* (Tesis de máster, Universitat de València).
26. López Velázquez, M., Santoyo Paez, Y., & Fuentes Ramírez, L. E. (2022). Levaduras no convencionales: Un valioso recurso para la innovación de la cerveza. *RD-ICUAP*, 8(22), 162–177. <https://doi.org/10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2022.22.664>
27. Manzanares, P., Vallés, S., & Viana, F. (2011). Non-Saccharomyces Yeasts in the Winemaking Process. En *Molecular Wine Microbiology* (pp. 85–110). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375021-1.10004-9>
28. Martín-García, F. J., Palacios-Fernández, S., López de Lerma, N., García-Martínez, T., Mauricio, J. C., & Peinado, R. A. (2023). The effect of yeast,

- sugar and sulfur dioxide on the volatile compounds in wine. *Fermentation*, 9(6), 541. <https://doi.org/10.3390/fermentation9060541>
29. McGovern, P. E., Glusker, D. L., Exner, L. J., & Voigt, M. M. (1996). Neolithic resinated wine. *Nature*, 381(6582), 480–481. <https://doi.org/10.1038/381480a0>
30. Mendoza García, E. A., & Barrientos Gámez, E. D. B. G. (2022). Mini fábricas: Las levaduras y su importancia en las fermentaciones industriales. *RD-ICUAP*, 8(24), 58–69. <https://doi.org/10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2022.24.986>
31. Mesas, J. M., & Alegre, M. T. (1999). El papel de los microorganismos en la elaboración del vino. *CYTA - Journal of Food*, 2(4), 174–183. <https://doi.org/10.1080/11358129909487599>
32. Mira de Orduña, R. (2010). Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International*, 43(7), 1844–1855. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.05.001>
33. Miranda-Castilleja, D. E., Ortiz-Barrera, E., Arvizu-Medrano, S. M., Ramiro-Pacheco, J., Aldrete-Tápia, J. A., & Martínez-Peniche, R. Á. (2015). Aislamiento, selección e identificación de levaduras *Saccharomyces* spp. nativas de viñedos en Querétaro, México. *Agrociencia*, 49(7), 759–773.
34. Ochoa Florez, D. E., Duran Osorio, D. S., & Trujillo Navarro, Y. Y. (2024). Adaptación de levaduras: factores de incidencia de estrés fermentativo del género *Saccharomyces* en vinificación. Una revisión. *Revista ION*, 37(1), 83–98. <https://doi.org/10.18273/revion.v37n1-2024006>
35. Padilla, B., Gil, J., & Manzanares, P. (2016). Past and future of non-*Saccharomyces* yeasts: From spoilage microorganisms to biotechnological tools for improving wine aroma complexity. *Frontiers in Microbiology*, 7, Art. 411. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00411>
36. Parapouli, M., Vasileiadis, A., Afendra, A. S., & Hatziloukas, E. (2020). *Saccharomyces cerevisiae* and its industrial applications. *AIMS Microbiology*, 6(1), 1. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2020001>
37. Petriagnani, D. B. (2022). *Selección de levaduras nativas Saccharomyces cerevisiae para vinificaciones en varietales blancos de viñedos de Pozo de los Algarrobos, San Juan*.
38. Pilco, C. J., Mejía, C. M., Toalombo, R. M., Azogue, D. M., & Báez, M. P. (2023). Identificación y cuantificación de levaduras *Saccharomyces cerevisiae* en la fermentación de mostos de vinos: *Identification and quantification of*

Saccharomyces Cerevisiae yeasts in the fermentation of wine musts. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(1), 2430–2445. <https://doi.org/10.56712/latam.v4i1.427>

39. Piñaga, F., Gallego, M. V., Fernández-Espinar, M. T., & Querol, A. (1995). Aplicaciones de la biología molecular en enología. *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos*, 35(4), 541–552.
40. Rodríguez, M. E. (2007). *Análisis genómico y molecular de levaduras vínicas. Aplicación a la mejora del proceso de fermentación de vinos mediante selección de levaduras autóctonas* (Tesis doctoral, Universidad de Cádiz).
41. Röcker, J., Strub, S., Ebert, K., & Grossmann, M. (2016). Usage of different aerobic non-*Saccharomyces* yeasts and experimental conditions as a tool for reducing the potential ethanol content in wines. *European Food Research and Technology*, 242(12), 2051–2070. <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2703-3>
42. Romero, E. G., González, M. F., Alonso, S. G., Cañas, P. M. I., & Morales, A. M. (2015). Cultivos mixtos de *Saccharomyces cerevisiae*: implantación y calidad de los vinos obtenidos. En *Enología 2.015: innovación vitivinícola* (pp. 122–125). Publicacions URV.
43. Sánchez, P. (2021). *Estudio del impacto de levaduras no-Saccharomyces para mejorar la calidad de vinos tintos* (Tesis de máster, Universidad de Valladolid). Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias.
44. Sánchez-Suárez, F., de Lerma, N. L., del Valle Palenzuela, M., Rosal, A., Moreno, J., & Peinado, R. A. (2023). Empleo de levaduras no-*Saccharomyces* como estrategia para aumentar la acidez de vinos dulces en un contexto de cambio climático. En *BIO Web of Conferences* (Vol. 68, p. 02042). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236802042>
45. Santos Navarrete, M. D. L. C. (2016). *Evaluación enológica de co-inoculación de levaduras Saccharomyces y no-Saccharomyces en vinos chilenos* (Tesis de máster, Universidad Politécnica de Madrid).
46. Suárez Lepe, J. A., & Iñigo Leal, B. (1992). *Microbiología enológica: Fundamentos de vinificación*. Ediciones Mundi-Prensa.
47. Suárez Lepe, J. A. (1997). *Levaduras vínicas: Funcionalidad y uso en bodega*. Ediciones Mundi-Prensa.
48. Suárez-Lepe, J. A., & Morata, A. (2015). *Levaduras para vinificación en tinto*. AMV Ediciones.

49. Suárez-Machín, C., Garrido-Carralero, N. A., & Guevara-Rodríguez, C. A. (2016). Levadura *Saccharomyces cerevisiae* y la producción de alcohol. Revisión bibliográfica. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 50(1), 20–28.
50. Togores, J. H. (2010). *Tratado de enología* (Vol. 1). Mundi-Prensa Libros.
51. Urtubia, A., Franco, W., De Lecco, C. C., Benavides, S., & Durán, A. (2023). Impacto de levaduras autóctonas no *Saccharomyces* en la reducción de etanol y perfil químico del vino chileno *Sauvignon blanc*. *BIO Web of Conferences*, 56, 02018. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20235602018>
52. Vera Macaya, D. L. (2020). *Levaduras autóctonas y su potencial biotecnológico*. EEA Alto Valle, INTA.
53. Villarreal Tobar, K. E. (2022). *Uso de las levaduras Lalvin EC-1118 y Premier blanc en la elaboración de un vino espumoso a base de uvilla (Physalis peruviana)*. Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica Estatal del Carchi (UPEC).
54. Zapater, J. M. M., Zurbano, P. F., Aquilué, M. P. S., & Domínguez, E. G. E. (2023). Ciencia y tecnología en el mundo del vino: cómo afrontar los retos del sector vitivinícola. *Encuentros Multidisciplinares*, 25(75), 7.