

Fermentación

El Arte y la Ciencia detrás de los **Alimentos**



Ana Belén Mejía Pérez
Ronny Fernando Robalino

Fermentación: El Arte y la Ciencia detrás de los Alimentos

Ana Belén Mejía Pérez
Ronny Fernando Robalino

ISBN: 978-9942-53-168-1

Primera edición, 2026

© **Autores**

Ana Belén Mejía Pérez

Email: belen.mejia@esPOCH.edu.ec

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1125-9128>

Grupo de Investigación para la Sostenibilidad de Cuenas Hidrográficas, Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Panamericana Sur km 1 ½, Riobamba, Chimborazo, Ecuador

Ronny Fernando Robalino Silva

Email: ronnyrobolino1@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-2412-5506>

© **Editorial Grupo Compás, 2026**

Guayaquil, Ecuador

www.grupocompas.com

<http://repositorio.grupocompas.com>

Primera edición, 2026

Esta obra ha sido sometida a un proceso de evaluación bajo el sistema de arbitraje doble ciego (double-blind peer review), garantizando el anonimato tanto de los autores como de los evaluadores externos. El dictamen favorable certifica que el contenido cumple con los más altos estándares de rigor científico, calidad editorial y originalidad exigidos por la comunidad académica internacional para su indexación y reconocimiento científico.

ISBN: 978-9942-53-168-1

Distribución online

Acceso abierto



Cita

Mejía, A. Robalino, R. (2026) Fermentación: El Arte y la Ciencia detrás de los Alimentos. Editorial Grupo Compás

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad de la publicación. El copyright estimula la creatividad, defiende la diversidad en el ámbito de las ideas y el conocimiento, promueve la libre expresión y favorece una cultura viva. Quedan rigurosamente prohibidas, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright.

Contenido

PARTE I. BASES MICROBIOLÓGICAS DE LA FERMENTACIÓN	5
Introducción a la Fermentación desde la Microbiología	6
Distinciones Bioquímicas y Eficiencia Energética	8
La Necesidad del Aceptor Endógeno de Electrones e Implantación Natural	11
Rendimiento Bioenergético y Mecanismos de Fosforilación Restringidos	14
El Costo Metabólico y su Impacto en la Biomasa	17
Naturaleza y Complejidad de los Metabolitos Fermentativos	19
<i>Diversidad Química de la Matriz: Familias de Metabolitos.....</i>	<i>20</i>
Huella Genética y Disponibilidad del Medio	24
Estabilidad y Seguridad Alimentaria: El Rol de los Metabolitos.....	28
La Biotransformación Integral de la Materia Prima	32
PARTE II ECOLOGÍA MICROBIANA Y MICROORGANISMOS FERMENTATIVOS	35
La Maquinaria Celular: Grupos Microbianos de Interés.....	36
<i>Bacterias Ácido Lácticas (BAL)</i>	<i>37</i>
<i>Levaduras</i>	<i>38</i>
<i>Hongos Filamentosos y Microbiotas Especializadas.....</i>	<i>39</i>
Fisiología de la Fermentación: Más allá del ácido	41
Idoneidad Tecnológica: El Criterio de Selección.....	45
<i>El Riesgo Patogénico y Productores Genómicos Toxigénicos.....</i>	<i>45</i>
<i>Criterios Fisiológicos y Operativos</i>	<i>47</i>
Taxonomía Funcional: Profundizando en las BAL	48
<i>Homofermentativas contra Heterofermentativas</i>	<i>50</i>
<i>Relevancia Genérica en Ecosistemas Alimentarios.....</i>	<i>52</i>
<i>La Funcionalidad Tecnológica Indispensable</i>	<i>55</i>
Levaduras Fermentativas: Las Reinantes del Reino Fungi.....	57

<i>El Propósito Dual y Efecto Protector de la Levadura</i>	58
<i>Saccharomyces cerevisiae: El Linaje Elegido</i>	58
<i>El Abanico de Metabolitos Alcohólicos</i>	60
<i>Ecología de Poblaciones en Levaduras</i>	61
El Poder de los Mohos en Fermentaciones Alimentarias.....	64
<i>Degradación Estructural y Liberación de Tesoros</i>	65
<i>Sinfonía Enzimática y Modulación Organoléptica</i>	67
<i>La Delgada Línea: Patogenicidad y Riesgo Fúngico</i>	69

PARTE III ECOLOGÍA MICROBIANA Y CONTROL DEL PROCESO

FERMENTATIVO..... 72

La Red Inusitada y Abigarrada: Comunidades Microbianas.....	73
<i>Mutualismo, Antagonismo y Sucesión</i>	74
La Razón Evolutiva de la Pluralidad Microbiana	75
El Origen: Establecimiento de la Microbiota Inicial	78
<i>Determinantes de la Composición Ecosistémica Comunitaria</i>	81
Sucesión e Interacciones Microbianas	85
<i>El Concepto de Sucesión Microbiana</i>	85
<i>¿Por Qué Algunos Microorganismos Predominan en Etapas</i> <i>Tempranas y Otros en Etapas Tardías?</i>	88
<i>Tipos de Interacciones entre Microorganismos Fermentativos</i>	90
Cómo las Interacciones Microbianas Determinan el Resultado Final de la Fermentación	94
<i>Interacciones Positivas: Cooperación que Enriquece el Producto</i> ...	94
<i>Interacciones Negativas: Control Microbiano y Modulación del Perfil</i> <i>Aromático</i>	96
<i>La Organización Comunitaria: Biofilms y Redes Microbianas</i>	97
<i>Las Interacciones como Determinante Central del Sabor y el Aroma</i>	98
Fermentaciones Espontáneas y Dirigidas	99
<i>La Fermentación Espontánea: Naturaleza, Imprevisibilidad y Riqueza</i>	99

<i>Ventajas y Desventajas de la Fermentación Espontánea</i>	100
<i>La Fermentación Dirigida: Control, Reproducibilidad y Precisión ...</i>	102
<i>Control Microbiano en Fermentaciones Dirigidas: Herramientas y Estrategias.....</i>	104
<i>.....</i>	107
PARTE IV. FACTORES QUE AFECTAN LA FERMENTACIÓN.....	107
<i>Factores Físicos</i>	108
<i>La Temperatura como Regulador Central de la Fermentación.....</i>	108
<i>Grupos Térmicos Microbianos y Su Relevancia en Fermentaciones</i>	109
<i>El Oxígeno y su Rol Regulador del Metabolismo Fermentativo.....</i>	111
<i>Diferencias entre Fermentaciones Aeróbicas y Anaeróbicas</i>	112
<i>Factores Químicos.....</i>	113
<i>El pH como Regulador del Proceso Fermentativo</i>	113
<i>La Relación entre Producción de Ácidos y Disminución del pH.....</i>	115
<i>La Actividad de Agua: Un Factor Crítico y a Menudo Subestimado</i>	118
<i>Concentración de Sal y Azúcar: Reguladores Osmóticos de la Fermentación</i>	119
<i>Factores Nutricionales y Temporales</i>	121
<i>El Sustrato: Fundamento Energético y Ecológico de la Fermentación</i>	121
<i>Cómo el Tipo de Carbohidrato Condiciona la Fermentación</i>	123
<i>Qué Ocurre cuando el Sustrato se Agota</i>	125
<i>El Tiempo de Fermentación y su Relación con la Calidad del Producto</i>	126
REFERENCIAS.....	129



Bases microbiológicas de la fermentación

Parte I



Introducción a la Fermentación desde la Microbiología

Cuando escuchamos la palabra fermentación inmediatamente la asociamos con la producción de alimentos como el pan, el vino o el yogur. Sin embargo, desde el punto de vista de la microbiología, el concepto no se define por el producto final ni por su uso industrial, sino por la forma específica en que los microorganismos obtienen energía.

En términos metabólicos, la fermentación se describe como un proceso catabólico mediante el cual los microorganismos degradan compuestos orgánicos –principalmente carbohidratos– para obtener energía celular. A diferencia de la respiración celular, en este proceso no interviene un aceptor externo de electrones como el oxígeno o el nitrato. En su lugar, el propio sustrato orgánico, o alguno de sus derivados metabólicos, actúa como aceptor final de electrones. Debido a esta característica específica, la degradación del sustrato es incompleta (Hocking, 2005).

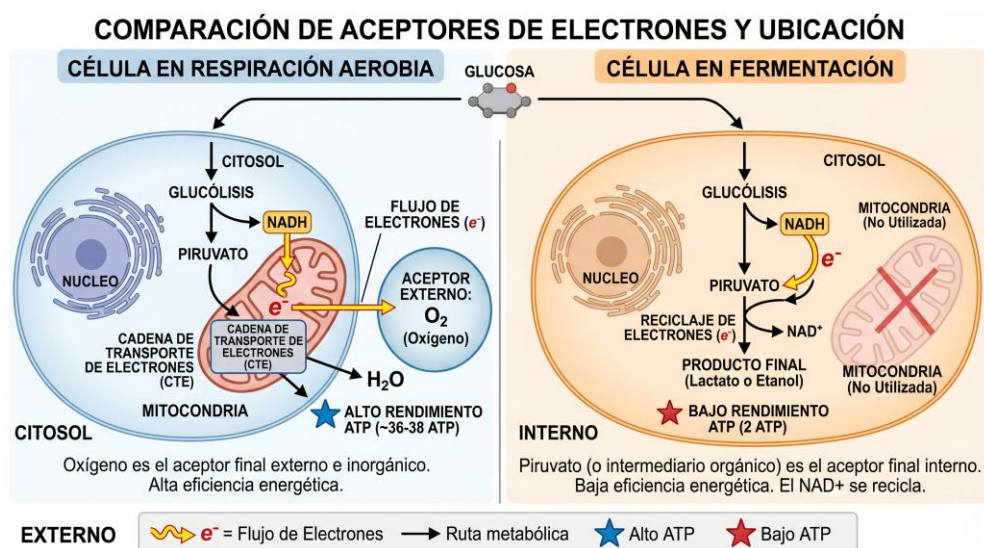
DATO CURIOSO *"El origen de la palabra"*

El término fermentación proviene del latín 'fervere', que significa hervir. Esto se debe a la efervescencia observada en los barriles de vino antiguo causada por la intensa producción de dióxido de carbono por parte de las levaduras.

El resultado principal de esta vía metabólica es la formación de metabolitos fermentativos clásicos, entre los que se encuentran alcoholes, ácidos orgánicos y gases. Por ejemplo, algunas levaduras especializadas convierten azúcares en etanol y dióxido de carbono, mientras que diversas bacterias producen ácido láctico, ácido acético u otros compuestos orgánicos (Verma et al., 2025). Estos productos no representan simples residuos metabólicos; más bien, constituyen el mecanismo esencial mediante el cual la célula reoxida transportadores electrónicos reducidos, permitiendo que el metabolismo energético continúe operando.

En consecuencia, la fermentación se considera un metabolismo energético típicamente anaeróbico, ya que se desarrolla de forma óptima en ausencia de oxígeno. Ahora bien, si consideramos otros campos de las ciencias biológicas, como la microbiología de alimentos o la biotecnología industrial el término ha adquirido un uso extendido. Llegando a usarse para referirse a cualquier proceso en el que microorganismos o sus enzimas transforman materias primas orgánicas en productos de valor comercial, aun cuando el sistema de cultivo pueda incluir fases con presencia limitada de oxígeno (Gabriele & Pucci, 2022).

Ilustración 1.1 Comparación de aceptores de electrones y su ubicación en respiración aerobia y fermentación.



Nota. La imagen compara los procesos metabólicos de la respiración aerobia y la fermentación, destacando el flujo de electrones, el uso del oxígeno como aceptor final externo en la respiración aerobia y del piruvato como aceptor interno en la fermentación, así como las diferencias en el rendimiento energético (ATP).

Pues bien, ahora conoces que la microbiología define de manera amplia a la fermentación como un proceso metabólico microbiano que degrada compuestos orgánicos de manera parcial para obtener energía. Para ello utiliza los derivados

del sustrato como aceptores finales de electrones y produce distintos metabolitos (alcoholes, ácidos, o gases). Es por esto último que se explica que distintos microorganismos pueden producir varios productos finales a partir de los mismos sustratos. Y no solo eso, sino que la gran diversidad de rutas fermentativas constituye la base de la complejidad subyacente de numerosos procesos ecológicos naturales y el motor de múltiples aplicaciones industriales modernas.

Distinciones Bioquímicas y Eficiencia Energética

Hasta aquí podrías contemplar la idea equivocada de que todos los microorganismos obtienen energía siguiendo una lógica similar: oxidar un sustrato orgánico y capturar parte de esa energía liberada en forma de ATP. Sin embargo, la fermentación representa una estrategia metabólica específica con varios rasgos bioquímicos detallados. Como ya se adelantó, uno de estos rasgos específicos es el tipo de aceptor final de electrones. El cual es de carácter endógeno, es decir, consiste en un intermediario orgánico generado dentro de la propia ruta metabólica citoplasmática, como el piruvato o el acetaldehído (Jackson, 2020). A diferencia de la respiración, en la cual, los electrones liberados se transfieren hacia aceptores externos al proceso primario, como el oxígeno.

Esta diferencia marca la ruta metabólica de cada proceso. Mas específicamente, depender de aceptores endógenos tiene como consecuencia la ausencia de una cadena de transporte de electrones activa. En la respiración tradicional, los electrones pasan a través de una compleja serie de transportadores proteicos asociados a membranas, un proceso dinámico que genera un gradiente electroquímico utilizado posteriormente para fabricar ATP. La fermentación, en notable contraste, prescinde de esta vasta maquinaria respiratoria; la obtención de energía ocurre casi exclusivamente mediante la llamada fosforilación a nivel de sustrato, un mecanismo evolutivamente más simple pero funcionalmente menos eficiente (Jameel et al., 2024).

Un segundo parámetro importante que considerar es el rendimiento energético. Al metabolizar glucosa por fermentación se generan 2 moléculas de ATP netas por molécula. Esto comparado con la respiración aerobia denota la deficiencia energética de la primera, ya que, esta segunda es capaz de generar entre 30 a 32 moléculas de ATP mediante la oxidación completa del sustrato. Es evidente que la fermentación sacrifica eficiencia energética a cambio de la ausencia de aceptores externos.

Por otro lado, la oxidación del sustrato en los sistemas fermentativos siempre resulta incompleta debido a que los electrones se transfieren a intermediarios orgánicos internos en lugar del oxígeno, el esqueleto de carbono no se mineraliza totalmente a CO₂. En su lugar, las células forman productos orgánicos relativamente reducidos, tales como el lactato, etanol, butirato u otros ácidos orgánicos más complejos (Ferreira et al., 2020). Estos compuestos constituyen la "energía restante" del diseño metabólico propio de la fermentación.

DATO CURIOSO *"La ineficiencia microbiana que mueve nuestros autos"* Lo que para un microorganismo es una ineficiencia energética, para nosotros es oro líquido. Cuando las levaduras consumen azúcar sin oxígeno, no logran extraer toda su energía. Gran parte de esta queda atrapada en su "desecho" metabólico principal: el etanol. Hoy en día, la humanidad aprovecha esta energía residual de forma masiva, utilizando este subproducto como un biocombustible clave para el transporte mundial.

Finalizando el análisis de esta ruta metabólica es necesario entender que la fermentación cumple una función redox esencial de supervivencia: la regeneración ininterrumpida de NAD⁺. Durante la glucólisis, la obligatoria oxidación de intermediarios metabólicos produce NADH. Si este vital cofactor no se re oxidara a su estado basal, el proceso global se detendría por completo. La reducción de los intermediarios orgánicos permite convertir exitosamente de

nuevo el NADH en NAD⁺, asegurando perennemente así la continuidad del flujo metabólico básico.

Ahora puedes comprender como se diferencia la respiración aerobia de la ruta metabólica de la fermentación y por qué es importante. Imagina que tu célula es un automóvil y necesita llegar lo más lejos posible utilizando el combustible (glucosa). Siempre que la autopista se mantenga libre y el combustible sea suficiente se ocupará el motor completo (respiración celular) y la movilización será eficiente, abarcando varios kilómetros. En cambio, cuando las condiciones sean adversas, por ejemplo, el auto se queda atascado en el barro. Los tripulantes deberán empujarlo a mano (fermentación) avanzando apenas unos metros y con un esfuerzo enorme.

Podemos inferir que, el conductor preferirá utilizar el automóvil en óptimas condiciones, así como los microorganismos recurrirán a la fermentación solo cuando el oxígeno escasee o cuando la demanda energética supere la capacidad de la respiración celular (aunque también hay organismos que fermentan de forma permanente). Estas singulares características han permitido que numerosos linajes microbianos subsistan en nichos ecológicos anóxicos donde cualquier sistema aerobio simplemente colapsaría.

La Necesidad del Aceptor Endógeno de Electrones e Implantación Natural

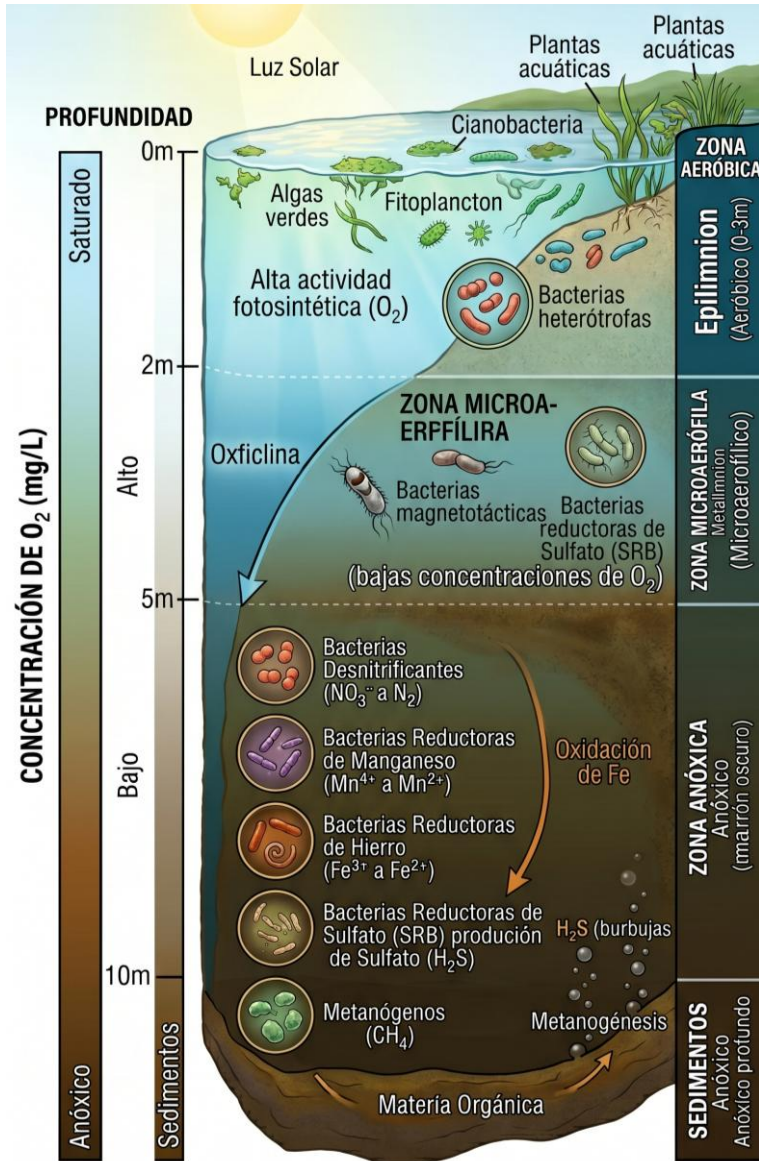
Analizar a nivel molecular por qué la maquinaria celular recurre a la fermentación requiere comprender el destino final del transporte electrónico. Un microorganismo que degrada moléculas de glucosa se enfrenta sin tregua a un problema de ingeniería química evidente: cada iteración catabólica libera pares de electrones libres. Si esos electrones no encuentran rápidamente un sumidero con el grado de afinidad adecuado, el metabolismo entero entra en punto muerto (Najafpour-Darzi, 2025). Ocurre que, en circunstancias limitadas donde la asfixia del dióxido de carbono priva a la vida de cualquier recurso, surge la fermentación, derivando hacia las barreras del ácido pirúvico el rol de atrapar y balancear a su vez tales residuos libres de hidrógeno.

Este balance es la fuerza redox imperativa. Un engranaje que si carece de oxidantes de alta polaridad –como el oxígeno natural en suelos saturados acuáticos o marismas costeras o en lodos limosos fangosos– interrumpe termodinámicamente todo avance del ciclo convencional aerobio de transferencia a nivel intracelular (Böck, 2009; Viridis et al., 2022). Carentes pues, inclusive a nivel genético, de los codificados mecanismos celulares aptos para respirar, ciertas estirpes de levaduras o bacterias enteras persisten limitadas y arraigadas, de principio al final, de dicha fosforilación obligatoria dependiente en los sustratos inmediatos.

Para comprender verdaderamente por qué este metabolismo pervive ubicuo en el mundo natural en nuestros días, es indispensable observar en acción a los biomas actuales. Un sedimento marino, por ejemplo, alberga extensos bancos limitados donde los microorganismos oxigenantes han agotado todo su recuso limitante, dando a su vez oportunidad de sucesión ecológica poblada extensamente por comunidades de arqueas metanogénicas emparejadas simbióticamente con robustas tramas sintróficas procariotas fermentativas (Banchi et al., 2023; Hutchinson et al., 2024; Pyzola et al., 2025). Estos densos

microambientes, exudan diariamente miles de toneladas métricas en equivalentes a etanol y otros efluvios producto de su perpetua asfixia y adaptación al entorno vital.

Ilustración 1.2 Columna ecológica de un lago estratificado y suelo inundado



Nota. La imagen muestra cómo cambia la concentración de oxígeno (O₂) con la profundidad en un lago estratificado, diferenciando zonas aeróbicas, microaerófilas y anóxicas.

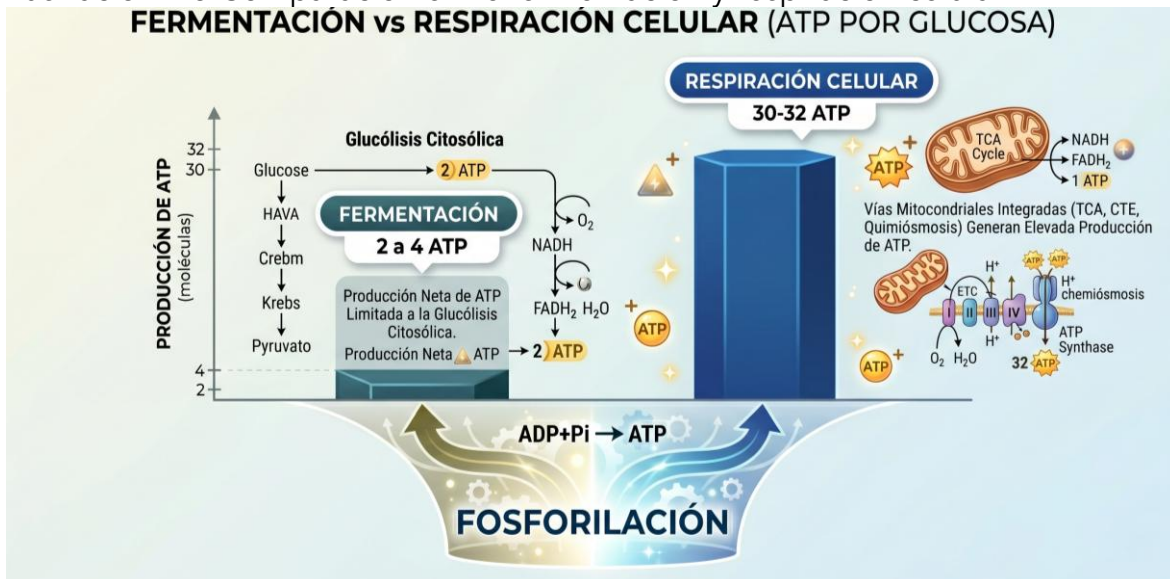
Probablemente el santuario más impresionante que sostiene ecosistemas enteros no reside en exóticos estuarios marinos inertes, sino calientes y latentes dentro del saco anterior inmenso del estómago de los rumiantes que pastan. Estos reactores operan a toda su magnitud como plantas depuradoras de biorresiduos mediante catálisis celular (Pavličková et al., 2026). De manera complementaria, estos microorganismos generan metabolitos que actúan como precursores fundamentales dentro del flujo nutricional de los ecosistemas biológicos, aportando compuestos esenciales que pueden ser aprovechados por organismos de mayor complejidad. Las cavernas profundas o nichos hidrotermales complementan la descripción del cuadro vivo (Finster, 2008), operando permanentemente gracias al remanente tenaz del fenómeno de la fermentación general y particular.

Rendimiento Bioenergético y Mecanismos de Fosforilación Restringidos

Retomando puntualmente la cuestión del recuento metabólico neto, cabe aclarar por qué la fermentación plantea reiteradamente tantas inquietudes pedagógicas; este procedimiento celular en efecto logra apalancar las exigencias basales produciendo habitualmente modestas cantidades de entre 2 y 4 ATP de recompensa por iteración (Fenchel et al., 2012; Schuster et al., 2008).

Ilustración 1.3 Comparación entre fermentación y respiración celular

FERMENTACIÓN vs RESPIRACIÓN CELULAR (ATP POR GLUCOSA)



Nota. La imagen compara la producción de ATP en la fermentación y la respiración celular, destacando que la respiración aerobia genera mayor cantidad de energía (30-32 ATP) debido a la participación del ciclo de Krebs y la fosforilación oxidativa, mientras que la fermentación produce únicamente entre 2 y 4 ATP.

A pesar de la marcada diferencia existente entre estos sistemas y los regímenes altamente sofisticados de rendimiento energético optimizado mediante procesos transquimiosmóticos presentes en los eucariontes fisiológicamente más avanzados, persiste una particularidad de gran relevancia. Esta consiste en un

incremento selectivo y discreto de la eficiencia metabólica observado en linajes altamente especializados, como los organismos relictos dependientes del rumen. Estos microorganismos logran acoplar enzimas periféricas al proceso central de descarboxilación, lo que les permite maximizar su rendimiento energético y obtener un tercer o incluso un cuarto fosfato libre. Este aprovechamiento adicional se produce a través de vías metabólicas colaterales, como la formación asociada de butirato, propionato sintético o acetato como producto residual celular (Van Lingen et al., 2019). Este mecanismo representa una estrategia adaptativa excepcional, un recurso metabólico de gran valor que evidencia el esfuerzo evolutivo de la vida por conservar y optimizar cada posibilidad de supervivencia energética.

Cuando estas células carecen de la maquinaria del sistema membranal especializado encargada de generar gradientes masivos de protones (Uyeda & Borovik, 2026; J. Chen et al., 2025), dependen por completo de mecanismos metabólicos más simples para la obtención de energía. No obstante, esta limitación no implica necesariamente una insuficiencia biológica inmediata en términos de supervivencia temporal, ya que pueden sostener su funcionamiento mediante el sistema de fosforilación a nivel de sustrato. Este proceso ocurre en el citosol y se basa en la transferencia directa de grupos fosfato a partir de reacciones catalizadas por isoenzimas acopladas localmente, sin necesidad de una cadena de transporte de electrones compleja (Kushkevych, 2023; Unden & Kim, 2021).

Aunque este mecanismo representa una estrategia energéticamente más modesta y de menor eficiencia termodinámica a largo plazo, su baja inversión inicial y su rapidez catalítica le confieren una importante ventaja adaptativa. En contextos donde existe abundancia de sustratos carbonados y la presión selectiva favorece altas tasas reproductivas, la velocidad de reacción puede compensar la menor eficiencia energética. Bajo estas condiciones, incluso las formas

metabólicas más simples pueden resultar altamente exitosas desde el punto de vista evolutivo, permitiendo la persistencia y expansión de estos organismos (Vibishan et al., 2025).

La mayor parte de este ATP se genera durante la glucólisis, la ruta metabólica central que transforma la glucosa en piruvato. En esta vía ocurren dos reacciones clave de fosforilación a nivel de sustrato: en primer lugar, la conversión de 1,3-bisfosfoglicerato a 3-fosfoglicerato, catalizada magistralmente por la fosfoglicerato quinasa, y, en segundo lugar, la conversión de fosfoenolpiruvato a piruvato, catalizada por el piruvato quinasa.

Cada una de estas reacciones transfiere directamente un grupo fosfato de alta energía al ADP, generando ATP. Como resultado de este balance, la glucólisis estricta produce un rendimiento neto de dos moléculas de ATP por cada molécula de glucosa metabolizada. Las reacciones fermentativas posteriores que siguen a la glucólisis –por ejemplo, la reducción de piruvato a ácido láctico o la conversión de acetaldehído en etanol– cumplen principalmente una función distinta: regenerar el cofactor NAD^+ a partir de NADH. Este paso final es esencial para que la glucólisis continúe operando, pero conviene enfatizar que no genera ATP adicional por sí mismo (Viridis et al., 2022).

En algunas rutas fermentativas singulares pueden existir pasos adicionales de fosforilación a nivel de sustrato, especialmente cuando se forman productos complejos como acetato o butirato, lo que permite a la célula obtener una pequeña cantidad adicional de ATP. Aun así, el principio bioenergético general permanece inalterable: toda la energía conservada durante los procesos de fermentación proviene exclusivamente de transferencias químicas directas de grupos fosfato desde intermediarios metabólicos al ADP. En síntesis, la fermentación y la fosforilación a nivel de sustrato están ligadas de manera indisoluble: la fermentación depende de este mecanismo como su única vía de

síntesis de ATP, mientras que las reacciones fermentativas propiamente dichas garantizan el equilibrio redox necesario para que las etapas generadoras de energía –principalmente la glucólisis previa– puedan mantenerse activas de forma indefinida.

El Costo Metabólico y su Impacto en la Biomasa

La aritmética del crecimiento microbiano es incuestionable: si un microorganismo opera con un presupuesto energético muy ajustado debido a la ineficiencia de la fermentación, la construcción de nuevas células se vuelve metabólicamente costosa. La baja eficiencia energética de este sistema no es simplemente un dato termodinámico de laboratorio; se traduce directamente en un menor rendimiento de biomasa y en tasas de proliferación sustancialmente reducidas.

DATO CURIOSO *"El dilema del crecimiento rápido"* Aunque la fermentación extrae mucha menos energía por molécula de glucosa, algunas levaduras y bacterias pueden metabolizar azúcar tan rápido mediante fermentación que logran crecer más velozmente que respirando, fenómeno conocido como Efecto Crabtree.

En la microbiología aplicada e industrial, esta relación metabólica es crítica y se cuantifica mediante la llamada «eficiencia biológica», un parámetro que revela qué porcentaje del sustrato de carbono consumido se ha convertido efectivamente en estructura celular, frente a cuánto se ha "perdido" irremediablemente en gastos fijos de mantenimiento o disipación de calor (Pérez-Leguía et al., 2025).

Para ilustrar este delicado equilibrio fenotípico, podemos analizar el cultivo in vitro del hongo comestible nativo *Qipatari* (Basidiomycota). La evidencia experimental constata que la eficiencia biológica no es una constante inmutable del organismo, sino una variable fuertemente dictada por el entorno. Cuando este micelio crece en un sustrato con alta disponibilidad de carbono y nutrientes

asimilables, alcanza una eficiencia biológica del 75 %. En contraste, al confinarlo en un medio nutricionalmente pobre y refractario, esta cifra cae dramáticamente al 56 %. Esa enorme diferencia del 19 % representa carbono estructural que nunca llegó a convertirse en cuerpo fructífero, ya que la maquinaria celular debió gastarlo, a modo de peaje, en el agobiante esfuerzo metabólico requerido para degradar un sustrato difícil sin obtener energía óptima (Pérez-Leguía et al., 2025).

Esta dinámica impone consecuencias ecológicas e industriales ineludibles. En la naturaleza, mantener un metabolismo ineficiente constituye a menudo una profunda desventaja competitiva; las especies que requieren forzosamente más sustrato para ensamblar la misma cantidad de biomasa suelen ser desplazadas o suprimidas por competidores metabólicamente más ágiles. Además, existe un insalvable "factor tiempo": la baja rentabilidad empuja al microorganismo a procesar exponencialmente más volumen de sustrato para crecer lo mismo, alargando irremediablemente los tiempos de colonización y producción de colonias (Pérez-Leguía et al., 2025).

A nivel aplicado, esto engendra la «paradoja del bioproceso» en la industria biotecnológica. En la producción biológica de compuestos como biopolímeros, una eficiencia mermada resulta ser un arma de doble filo espectacular: si el estrés lleva al microorganismo a degradar el propio producto valioso que acaba de sintetizar para cubrir su deuda energética, la eficiencia global del reactor se desploma. El proceso entero termina entonces consumiendo recursos onerosos que no contribuyen al producto útil final (Naranjo et al., 2025).

Naturaleza y Complejidad de los Metabolitos Fermentativos

Lejos de ser un proceso lineal y sumamente predecible, cuando un microorganismo coloniza un sustrato rico en carbohidratos –como una tina de suero de leche o una densa masa de pulpa de cacao– nos encontramos ante la orquestación de una sofisticada coreografía analítica y bioquímica. El resultado directo de esta masiva interacción celular con el medio es lo que denominamos metabolito fermentativo: un compuesto orgánico derivado del catabolismo microbiano que no solo define la identidad sensorial y estructural de un alimento o bioproducto, sino que garantiza desde el primer minuto su estabilidad térmica, su preservación y su formidable valor biológico.

En la actual tecnología de alimentos, la fermentación se maneja fundamentalmente como biotransformación; una operación donde los inóculos microbianos dismantelan ávidamente carbohidratos (tales como la lactosa, sacarosa, fructosa o diversas formas de almidón) para sobrevivir. Tal y como fundamentan los estudios contemporáneos de Coss et al. (2025) y Lugo et al. (2021), esta conversión enzimática debe ocurrir imperativamente bajo condiciones anaerobias estrictas o microaerobias, originando sustancias orgánicas significativamente más pequeñas, simples y reactivas que el sustrato parental.

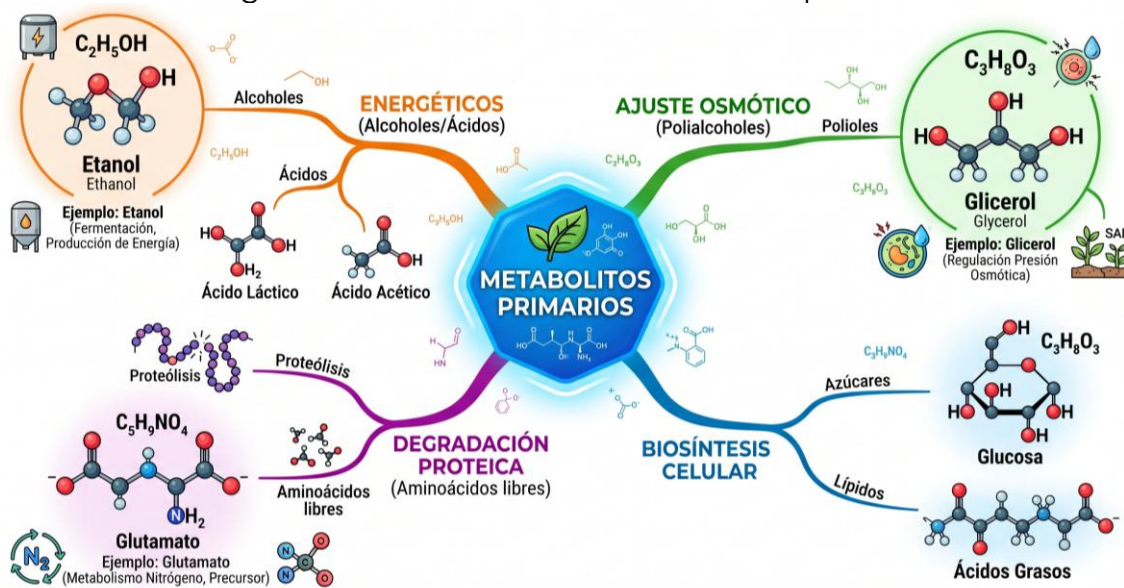
El destino final de estos azúcares no es, en forma alguna, universal. Dependiendo intrínsecamente del perfil genómico de la cepa microbiana dominante y de las variables fisicoquímicas del ecosistema, la gran ruta metabólica bifurca su flujo de carbono hacia una asombrosa diversidad de exudados productivos:

Diversidad Química de la Matriz: Familias de Metabolitos

Si redujéramos peligrosamente nuestra comprensión de la fermentación a la simple fábrica monótona de la destilación de alcohol o a un caldo de ácido láctico curativo, ignoraríamos ciegamente la inmensa profundidad del ecosistema. Un solo proceso de fermentación espontánea es capaz de generar desde decenas hasta cientos de diminutas moléculas aromáticas, ácidos, esterés y alcoholes distintos. Estas familias actúan como ensamblaje sinérgico que transforma estructuralmente un insípido ingrediente crudo en algo sublime. Esta vibrante red química suele dividirse desde la biotecnología descriptiva en dos categorías mayores: metabolitos primarios –aquellos directamente dependientes del estado de proliferación– y secundarios.

Los metabolitos primarios son, por definición, sustancias directamente sintetizadas y esparcidas por el microorganismo para sostener obligatoriamente su ciclo orgánico celular activo, procurarse energía vital de enlace y dividirse físicamente.

Ilustración 1.4 Diagrama de ramificación de metabolitos primarios



Nota. La imagen representa los principales metabolitos primarios y sus funciones biológicas, como la producción de energía, el ajuste osmótico, la biosíntesis celular y la degradación proteica.

Dentro de este grupo de metabolitos primarios, hallamos primero el eje de energía (alcoholes mayores y ácidos). En todas las fermentaciones alcohólicas verdaderas, el motor biológico *Saccharomyces cerevisiae* escinde los azúcares y exuda etanol y dióxido de carbono como subproductos cardinales que gobiernan todo el nicho ecológico (Stanzer et al., 2023; Walker & Stewart, 2016). En flancos ecológicos muy lejanos, las bacterias lácticas (BAL) o acéticas privilegian la emanación de una vasta e intrincada gama de ácidos orgánicos fuertes; ácido láctico, succínico, cítrico, y málico, entre docenas más. Estos últimos no solo otorgan la inconfundible 'acidez de la cura' en los paladares mundiales, sino que son formidables herramientas antibacterianas sin las cuales la conservación natural de la matriz colapsaría víctima de la putrefacción (Magfiroh et al., 2025; Wu et al., 2021). Asimismo, en contextos ecosistémicos únicos como el enorme espacio del estómago ruminal o en la elaboración de ensilados forrajeros biológicos comerciales, la atención entera recae por impacto de volumen sobre la fracción veloz de los Ácidos Grasos Volátiles (AGV), descollando el ácido acético y el propionato (de Coss et al., 2025; Rojas et al., 2021).

Moviéndose paralelamente a estos gigantes, figura un conjunto destinado al ajuste físico interno y a la textura: los polioles. Moléculas plácidas e inertes sensorialmente asociadas a azúcares lentos como el resbaloso glicerol o su contraparte edulcorante, el eritritol y 2,3-butanodiol. Su presencia no es coyuntural; sirven como tampones para lograr estabilizar a toda costa el equilibrio redox del plasma microbiano y mantener a raya estallidos por shock osmótico. Y en la gastronomía biológica aportan el elegante 'cuerpo', viscosidad profunda y extrema redondez gustativa que distingue un gran vino o una esmerada cerveza belga genuina (Minebois et al., 2020; Walker & Stewart, 2016).

No solo el carbono es transformado magistralmente; la matriz de proteína es desintegrada. La fermentación libera a gran escala fracciones nitrogenadas

esenciales mediante un ataque agresivo de proteasas nativas microbianas. Al trozar el esqueleto polipeptídico en fracciones mínimas, el ecosistema satura el tejido de pequeños péptidos vibrantes y sobre todo asimilables aminoácidos libres –tales como la L-lisina, prolina o el potentísimo ácido glutámico–. Este despliegue de bloques de construcción reacciona al paladar detonando de forma incuestionable las notas *umamis*, elevando dramáticamente los perfiles biodisponibles del valor y el equilibrio nutricio real que exhibe posteriormente el alimento final en las tablas de laboratorio (Harlé et al., 2025; Luo et al., 2025).

A un nivel aún más refinado y efímero se erige la generación del paisaje y percepción sensorial de volátiles y aromas. A través del metabolismo lipídico y la degradación colateral de los aminoácidos del medio, las bacterias y levaduras orquestan combinaciones únicas. Mientras la aparición de ésteres siempre resulta comercialmente buscada y codiciada debido a sus espectaculares y frescos aportes de frutalidad perfumada a las bebidas refinadas (Bai et al., 2025), la aparición incontrolada de ciertos aldehídos o de peligrosas aminas biogénicas histamínicas marcan una clara señal de advertencia: denotan fehacientemente al catador o tecnólogo que el bioproceso discurrió carente de sanidad con un franco descontrol microbiano, acercándose ominosamente a estadios letales de deterioro pútrido avanzado (Luo et al., 2025).

DATO CURIOSO *"Identificados por su propio aliento"* Los microorganismos exhalan perfiles de gases tan únicos que hoy en día, mediante narices electrónicas de alta sensibilidad y cromatografía, los científicos pueden identificar si un jugo de frutas ha sido colonizado por cepas de levadura buenas o malas, simplemente oliendo el gas emitido, mucho antes de observar turbidez.

Por último, enmarcados en el campo del valor biológico añadido despuntan los metabolitos secundarios y las moléculas generadoras de bioactividad. Diferir de sus parientes primarios implica una característica de diseño evolutivo fascinante: no resultan ser estrictamente biológicamente perentorios para forzar una división

celular inmediata en la fase acelerada de crecimiento, sino que configuran verdaderos arsenales que dotan a la cepa fundadora de excepcionales prebendas competitivas biológicas sobre los patógenos intrusos. Al amparo de estos desarrollos se descubrieron recientemente maravillas metabólicas relativas a dinámicas de biotransformación en torno a la gigantesca familia química vegetal de los polifenoles. Robustas colonias estables de bacterias ácido lácticas se evidencian cada vez con mayor claridad como formidables laboratorios enzimáticos capaces de alterar molecular y tridimensionalmente la intrincada topografía de flavonoides y rígidos ácidos hidroxicinámicos anclados dentro del entramado celular de cereales ancestrales y variados sustratos vegetales fermentables; esta intervención promueve una sustancial elevación en el poder antioxidativo del alimento y un aumento directo de su asimilación real y efectiva clínica sistémica al transitar a lo largo del tracto gastrointestinal (Gaur & Gänzle, 2023; Magfiroh et al., 2025). El cacao, a modo de ejemplo mundial sublime de biotransformación, debe enteramente su milagroso bouquet a estos microbios, cuya agresiva penetración transforma para siempre a la amarga epicatequina local y degrada drásticamente las irritantes metilxantinas teobromínicas que saturan el cotiledón aséptico del grano original recolectado por manos campesinas (Gonzalez et al., 2021; Rojas et al., 2021).

Para sellar un blindaje definitivo interno contra el medioambiente estocástico de las instalaciones agroindustriales, las cepas virtuosas emanan formidables concentraciones defensivas de moléculas polipeptídicas catalogadas en la actualidad industrial como defensinas y bacteriocinas. Estos pequeños anillos catiónicos –la célebre nisina siendo quizás el exponente indiscutido pionero representativo– permean de modo letal la doble bicapa vulnerable transmembranal de una hueste infame de patógenos y causantes comunes de la putrefacción generalizada estropeadora de comida, operando como antimicrobianos letales naturales dirigidos desde el interior en pleno siglo XXI (Du et al., 2023; Kumar et al., 2020).

En perspectiva general, el inmenso bioproceso natural de la fermentación microbiana trasciende a una mera maquinaria inerte de obtención forzada reactiva de etanol crudo comercial y de la generación rústica e industrial de ácido láctico alimentario para su uso. En realidad opera con rigurosa perfección técnica como una inigualable "refinería biológica", que a temperatura ambiental desmantela desde adentro inmensas barreras celulares rígidamente estructuradas de todo el reino vegetal o animal inerte de nuestro mundo para, a continuación, reensamblarlas magistral, lenta e implacablemente, en nuevas entidades aromáticas, infinitamente seguras a lo largo del paso de extensas eras históricas, y, vitalmente hablando, más nutritivas para beneficio irrefutable de la estirpe humana.

Huella Genética y Disponibilidad del Medio

De cara al diseño controlado y la innovación dirigida, es válido inquirir si es realmente la especie de microorganismo el artífice que decreta el dictamen y resultado absoluto de una fermentación, o si, por el contrario, es el sustrato subyacente el verdadero componente determinante de las fronteras químicas finales. Esta dicotomía constituye uno de los ejes rectores de discusión y análisis profundo en el seno de la investigación investigativa de nuestra joven microbiología moderna y tecnológica. Aunque histórica y tradicionalmente propendemos mentalmente, debido a fuertes paradigmas empíricos, a asociar estrechamente y de manera categórica moléculas con una lista fija de ciertos taxones específicos indiscutidos, tales como referir etanol siempre uniendo invariablemente a un puñado selecto de levaduras o moho. La evidencia nos muestra lo opuesto: la sumatoria real química y total en vivo dictamina que lo que denominamos un perfil global general estático de metabolitos generados, es una maravilla biológica intensa y fundamentalmente plástica y reactiva. No existe, por tanto, una autopista de único destino fijo, sino el choque maravilloso gestado

entre los estrictos recursos primarios y la afinación enzimática de modulación genética a cargo explícito de variados huéspedes competentes.

El tipo exacto de polímero carbonado ofrecido emparejado a la gama rica de nitrógeno presente estipulará tempranamente a los sensores moleculares de membrana hacia donde deberán obligatoriamente desviarse los inmensos volúmenes internos de transflujo central –ya sea canalizados rumbo directo a la acelerada maquinaria glucolítica, encestados para su combustión eventual prolongada por la escotilla del ciclo rítmico y circular del ácido cítrico o desviados por ramificaciones estériles aledañas colaterales de simple pero constante fermentación– (Lugo et al., 2021; Pérez-Sánchez et al., 2025; Rosas-Davila et al., 2025). El sustrato inerte ostenta tamaña injerencia metabólica, que estadísticamente por su peso, es el solo origen causal determinante sobre una de las porciones descriptivas más significativas subyacentes responsable y causante del gran abanico de alteraciones y modulaciones dinámicas que vemos expresadas analíticamente cuando catalogamos al 'metaboloma' (Bedu-Ferrari et al., 2024; Xie et al., 2024).

Investigaciones de punta sobre géneros complejos formados por exóticas bacterias en el mundo marino asiladas como formas asombrosas endémicas singulares de *Sulfitobacter*, testifican cuán dependiente es el fenotipo; al punto absoluto donde solo una fracción cercana exiguamente al escaso quince por ciento del perfil aromático de sus cuantiosos metabolitos y emanaciones naturales mantiene cierta integridad y uniformidad constatable constante si al individuo se lo transfiere de una matriz inicial rica pura en valvas y se le ofrece, en su reemplazo forzado, alimentarse sobre medios sintéticos simples acéticos o saturados en sales inorgánicas con glutamato disperso.

Cuando las condiciones ambientales cambian de manera drástica, los organismos se ven obligados a activar amplios repertorios genéticos que permanecían previamente silenciados, lo que permite respuestas adaptativas frente a nuevas

presiones del entorno (Basso et al., 2022). Este fenómeno también se observa de manera análoga en cepas representativas de ascomicetos del Reino Fungi.

Por ejemplo, aislamientos de *Talaromyces pinophilus*, reconocido como un importante invasor ambiental, muestran en registros espectrofotométricos una producción aproximadamente duplicada de compuestos aromáticos volátiles – principalmente terpenoides y alcoholes de mayor peso molecular– cuando crecen en medios ricos, como agar de infusión de papa suplementado con carbohidratos simples, en comparación con cultivos sometidos a condiciones de limitación nutricional durante periodos equivalentes (Adelusi et al., 2022).

Estos resultados evidencian que la disponibilidad de recursos y las características del entorno influyen de manera determinante en la expresión metabólica y fisiológica de los organismos. Comprender esta relación permite reconocer que el potencial biológico no depende únicamente de la capacidad intrínseca del microorganismo, sino también de las condiciones que favorecen o restringen su expresión. Ignorar cualquiera de estas dimensiones limita significativamente la comprensión y el aprovechamiento aplicado de estos sistemas biológicos.

Si se considera al sustrato como el soporte físico sobre el cual ocurre la transformación biológica, el genoma microbiano puede entenderse como el principal determinante de dicho proceso. La herencia filogenética de cada microorganismo constituye la base que define si una bacteria posee, de manera innata, las rutas metabólicas, enzimas y cascadas proteicas necesarias para sintetizar un producto específico (Han et al., 2021). En este sentido, la capacidad de generar determinados compuestos no depende únicamente de la disponibilidad del sustrato, sino también del potencial genético previamente establecido por su historia evolutiva.

Sin embargo, la expresión de este potencial está fuertemente condicionada por el entorno físico y químico en el que ocurre el crecimiento microbiano. Factores como variaciones significativas en el pH o condiciones de estrés, como la limitación de oxígeno, pueden inducir desviaciones en las rutas metabólicas

principales hacia vías alternativas de respuesta adaptativa. Estas modificaciones pueden favorecer la síntesis de compuestos secundarios, incluyendo nucleótidos estables y metabolitos que alteran de forma significativa las propiedades sensoriales del producto final, como la textura, el aroma y el perfil organoléptico de quesos durante su maduración, incluso en etapas posteriores a la producción inicial (Gardner et al., 2020; Yang et al., 2024; Guillín et al., 2025; Speckmann et al., 2024).

Como reflexión final dentro del estudio de los microorganismos industriales y su control en sistemas productivos, resulta fundamental comprender que el éxito de cualquier proceso biotecnológico moderno no depende exclusivamente del microorganismo aislado como inóculo. Concebir una cepa microbiana de manera aislada, como si su potencial estuviera determinado únicamente por sus características intrínsecas, constituye una visión incompleta y limitada.

El verdadero rendimiento industrial surge de la interacción estrecha entre la capacidad metabólica de la cepa seleccionada y las condiciones físicas, químicas y nutricionales del medio en el que esta se desarrolla. Ya sea en la producción de quesos madurados de alta complejidad sensorial, donde los microorganismos participan en la generación de sabores y aromas característicos, o en la modulación de ecosistemas biológicos complejos como el microbiota intestinal asociada a la salud humana, el resultado final depende de una relación de equilibrio entre el microorganismo y su entorno (Martinez et al., 2025; Luo et al., 2024; Mukherjee et al., 2025). Por ello, la excelencia en una planta productiva no radica únicamente en la selección de una cepa eficiente, sino en la capacidad de diseñar y controlar de manera precisa el ambiente que permita la máxima expresión de su potencial biológico.

Estabilidad y Seguridad Alimentaria: El Rol de los Metabolitos

Alcanzar la seguridad microbiana en la industria de matrices alimentarias ha dependido históricamente del procesamiento térmico intensivo. Sin embargo, este enfoque esterilizador o pasteurizador exige un sacrificio inexorable: moléculas vitales como vitaminas, pigmentos y otros micronutrientes termolábiles sufren mermas drásticas bajo la acción del calor. Para mitigar esta pérdida, la industria ha optado por la fortificación sintética posterior o la urgente migración parcial hacia tecnologías de procesamiento no térmico como estrategia para retener el apreciado valor funcional original del alimento (Amir Ashraf & Adnan, 2025). No obstante, es la fermentación biológica la que provee un proceso natural y ecológico a este dilema, estabilizando matrices sin la necesidad de recurrir a temperaturas destructivas.

DATO CURIOSO *“El primer conservante de la historia”* Antes de la invención de los refrigeradores, la humanidad garantizaba la supervivencia alimentaria invernal casi enteramente a través de la domesticación involuntaria de bacterias lácticas productoras de ácido. Quesos y chucrut no eran delicias gastronómicas, ¡eran tecnología de supervivencia!

Un alimento fermentado no se conserva aislado o estáticamente. Se mantiene prolongadamente seguro porque, a lo largo de su maduración biológica, se acumula una poderosa constelación de compuestos metabólicos que rediseñan desde la base química su ecosistema interno. Estos metabolitos fermentativos producidos por el microbiota dominante actúan como verdaderos arquitectos de la estabilidad microbiológica. Uno de los flancos más decisivos lo marca la acumulación sistémica de ácidos orgánicos fuertes celulares, destacando particularmente el ácido láctico y acético.

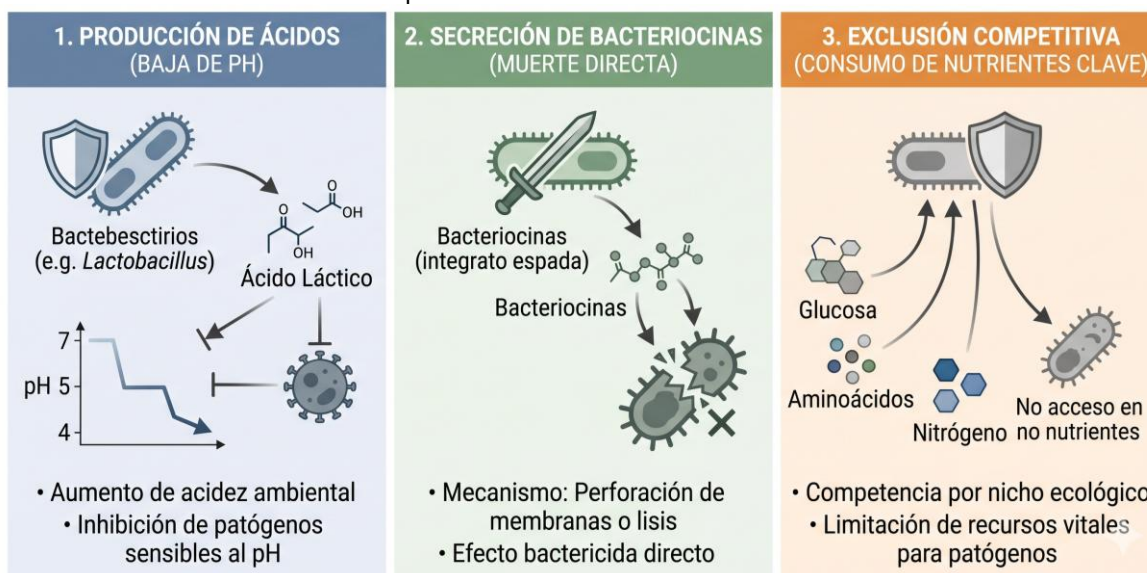
Estos compuestos orgánicos reducen agresivamente el pH y modifican el estricto equilibrio ácido-base del sistema. En microbiología, un simple descenso

logarítmico del pH libre no representa únicamente un número indicador menor. Implica una contundente alteración estructural en el empaquetamiento de las proteínas superficiales microbianas, un destrozo en la permeabilidad de las membranas lipídicas enemigas y finalmente interrumpe toda la actividad catalítica y enzimática motriz de los microorganismos perjudiciales sensibles al ácido (Nemo & Bacha, 2020). Extensos análisis ómicos aplicados sobre matrices en estado natural de fermentación verifican analíticamente de continuo cómo la acidificación gradual avanza inversamente correlacionada con la temida colonización y proliferación de taxones biológicos indeseables patológicos o deteriorantes, logrando robustecer extraordinariamente la estabilidad sistémica global y temporal (Adebo, 2025).

Además de la exclusión competitiva indirecta mediante la modificación de parámetros ambientales, muchos microorganismos producen metabolitos que actúan como verdaderas “armas químicas” frente a especies competidoras. Entre ellos destacan las bacteriocinas, péptidos antimicrobianos sintetizados y secretados principalmente por bacterias ácido-lácticas seleccionadas, cuya función consiste en inhibir o eliminar microorganismos vecinos mediante la alteración de la integridad de sus membranas citoplasmáticas. Estas moléculas pueden generar poros en la membrana celular de bacterias susceptibles, provocando la pérdida de componentes esenciales y, finalmente, la muerte celular (Pujato et al., 2022).

De manera complementaria, otros metabolitos secundarios menos específicos también contribuyen al control microbiano. Entre ellos se encuentran el peróxido de hidrógeno, con alta capacidad oxidativa, y el etanol producido durante la fermentación, cuyos efectos osmóticos y desnaturalizantes afectan la estabilidad estructural y funcional de células invasoras. La acción combinada de estos compuestos reduce significativamente la supervivencia de microorganismos no deseados en sistemas de fermentación y producción industrial.

Ilustración 1.5 Vías de la biopreservación fermentativa



Nota. La imagen muestra tres mecanismos principales de biopreservación fermentativa: la producción de ácidos que disminuyen el pH, la secreción de bacteriocinas con efecto bactericida directo y la exclusión competitiva mediante el consumo de nutrientes esenciales

La estabilidad microbiológica de un sistema no depende únicamente de la producción de compuestos antimicrobianos. Como señala Nout (2024), una parte fundamental de la seguridad alimentaria surge de la propia dinámica poblacional de los microorganismos presentes. Cuando el microbiota beneficioso logra establecerse y multiplicarse de manera dominante, consume rápidamente los recursos disponibles del medio, como azúcares simples, aminoácidos libres y micronutrientes esenciales. Esta rápida utilización de los sustratos genera un proceso de exclusión competitiva que limita el crecimiento de microorganismos invasores o potencialmente patógenos, dificultando su colonización posterior. En este contexto, la competencia microbiana no se reduce únicamente al consumo de nutrientes, sino que también involucra mecanismos de comunicación celular altamente organizados. A través del denominado *quorum sensing*, los microorganismos liberan y detectan moléculas señal que les permiten coordinar respuestas colectivas frente a cambios ambientales o amenazas

externas. Este sistema de comunicación regula procesos como la formación de biopelículas, la expresión de factores de defensa y la adaptación metabólica conjunta, fortaleciendo así la estabilidad y protección del ecosistema microbiano (Zeng et al., 2023).

Adicionalmente a la batalla orgánica biológica contra el medio agresivo, actúan factores que protegen físicamente. Numerosas cepas endémicas y salvajes han demostrado la valiosa propiedad fortuita de conferir barreras frente a la oxidación lipídica progresiva post-fabricación. Secretan y aportan a la mezcla copiosos y espesos exopolisacáridos pegajosos, inmensos biopolímeros mucilaginosos complejos coloidales que modifican drásticamente para beneficio propio toda la reología fina espacial (De Souza et al., 2023). Estos engrosamientos no solo protegen biológicamente en microclimas acuosos en matriz seca a las células, sino que gelifican las macromoléculas atrapando el agua.

La Biotransformación Integral de la Materia Prima

En la actual era de sensores de alta precisión, tecnologías ópticas avanzadas y modelos de inteligencia artificial aplicados a la agroindustria, la industria alimentaria continúa dependiendo de una de las biotecnologías más antiguas desarrolladas por la humanidad: la fermentación. Lejos de ser desplazada por los avances tecnológicos, esta práctica mantiene su relevancia debido a su sólida base fisiológica y a su capacidad para responder de manera eficiente a desafíos productivos complejos.

Su permanencia se explica porque la fermentación no solo representa un proceso tradicional respaldado por siglos de experiencia empírica, sino también un sistema biológico que hoy puede ser comprendido, optimizado y controlado mediante herramientas analíticas modernas, como la espectroscopía avanzada y el monitoreo de precisión. Esta integración entre el conocimiento ancestral y la tecnología contemporánea permite mejorar la calidad, seguridad y sostenibilidad de los alimentos, convirtiendo a la fermentación en un eje estratégico para enfrentar futuras crisis relacionadas con la disponibilidad de insumos vegetales y la seguridad alimentaria global (Vermelho et al., 2025).

Se revela así que no estamos propiamente ante una mera «preservación y estabilización pasiva por reposo». En el contexto mundial contemporáneo, el desarrollo y fomento de este mecanismo celular transita y abraza la metamorfosis bioquímica íntima molecular denominada popularmente biotransformación (Adesulu-Dahunsi et al., 2022). Esto acontece en sus cimientos más básicos: al inocularse un sustrato lignocelulósico fibroso renuente o fracciones proteicas inmensas agolpadas como un músculo recio animal fibroelástico post-mortem, nos arrojan en una verdadera piscina coloidal lítica tridimensional y digestiva catalizada donde polímeros intratables originalmente impenetrables e

imposibles nutricionalmente resultan minuciosa y diligentemente fragmentados a escala celular y transformados a un estado molecular diminuto funcional.

En este proceso de transformación, las proteínas de alto valor estructural presentes en embutidos cárnicos secos y madurados son degradadas de manera controlada mediante la acción enzimática microbiana. Esta proteólisis no solo contribuye a mejorar la textura del producto, sino que también ayuda a reducir procesos indeseables, como la oxidación lipídica asociada al deterioro sensorial y a la pérdida de calidad (Lu et al., 2021; Wang et al., 2022). Como resultado, se obtienen texturas más suaves, fundentes y ligeramente untuosas al paladar, además de perfiles organolépticos mucho más complejos, caracterizados por notas ahumadas, terrosas y matices aromáticos imposibles de encontrar en la carne fresca sin maduración. Todo este desarrollo ocurre gracias a la acción silenciosa pero decisiva de los microorganismos del inóculo, cuyo sistema multienzimático actúa como una herramienta biológica de transformación fina, capaz de modificar profundamente las propiedades sensoriales del alimento sin intervención física directa.

En matrices rigurosamente vegetales duras o cereales inquebrantables, esta alquimia celular eleva y potencia enormemente el potencial de absorción general al torrente sanguíneo promoviendo que el valor latente biológico asimilable y accesible aumente su estado original de materia inerte. La consiguiente fermentación no solo destrona en su accionar a potentes toxinas defensivas inherentes fitosanitarias, anulando paralelamente molestos o peligrosos componentes inhibidores vegetales anti nutricionales formidables comunes, sino que, a través de recambios, los azúcares se trasmutan. A lo largo del proceso fermentativo, muchas bacterias son capaces de sintetizar vitaminas que inicialmente no se encuentran presentes en el sustrato, utilizando compuestos precursores disponibles en el medio. Asimismo, generan péptidos bioactivos y metabolitos con potencial probiótico que pueden ejercer efectos beneficiosos

sobre la salud del consumidor. Entre estos efectos se incluyen el fortalecimiento de la respuesta inmunológica, la mejora de la salud intestinal y la modulación positiva de distintos procesos metabólicos (Garcia & Remize, 2022; Singh & Kumar, 2025; Sahoo et al., 2023).

Estos hallazgos permiten comprender a los microorganismos fermentativos no solo como agentes de transformación alimentaria, sino también como verdaderas biofábricas capaces de producir compuestos funcionales de alto valor nutricional y sanitario. De este modo, los alimentos fermentados pueden actuar como vehículos naturales de moléculas con potencial terapéutico, integrando nutrición y salud en un mismo sistema biológico. Resulta insoslayable referenciar desde una óptica contemporánea su aporte gigantesco ecológico como puente bioeconómico. Transforma todo el residuo agrario masivo subestimado en preciado y redituable recurso productivo.

Toneladas de desechos contaminantes lácteos o subproductos agrotecnológicos apilados infructuosamente sin rumbo comercial resultan elegantemente hidrolizados mediante pulsos e inyecciones vigorosas (e.g. ultrasonido de baja frecuencia incitador del crecimiento bacteriano) que destapan las cataratas enzimáticas masivas (Shokri et al., 2020). Una cáscara tirada u hoja vegetal, a través de las rutas químicas anaerobias correctas es un nodo y eslabón productivo bioplástico, base para valiosa vainillina pura, biogás volátil metánico ardiente o un abrevadero peptonizado exquisito de reuso. Todos estos productos biológicos no ocurren al azar; la optimización a través del análisis bioinformático ómico mundial estricto sobre sensores biológicos NIR busca domesticar su base para estandarizar este poder (Begum et al., 2021; Choudhury et al., 2021).

Ecología microbiana y microorganismos fermentativos

Parte II



La Maquinaria Celular: Grupos Microbianos de Interés

Resulta una simplificación excesiva asumir que, detrás de una formulación probiótica comercial exitosa, actúa de manera aislada un único microorganismo como agente exclusivo de todos los efectos observados. En realidad, los sistemas biológicos asociados a los probióticos funcionan a través de interacciones complejas entre múltiples microorganismos, el sustrato disponible y el entorno en el que se desarrollan. Las matrices en fermentación funcionan a nivel ecológico como densos consorcios de microbios estratificados altamente dependientes, entablando una cadena trófica invisible celular. Unos abren hábil y agresivamente la inaccesible fortaleza polimérica de los macromateriales para el resto; subsiguientemente asume una brigada intermedia el trabajo químico que propaga eficientemente las señales ambientales del inicio rápido letal para patógenos; y luego el tercer grupo remata exquisitamente la producción refinando la matriz en compuestos invaluablemente sumamente penetrantes y de profunda palatabilidad estética.

Esta organización biológica de carácter sinérgico e interdependiente, basada en la cooperación funcional entre microorganismos y condicionada tanto por las exigencias del entorno como por el control antropogénico aplicado durante los procesos de fermentación, representa uno de los principios fundamentales de la biotecnología alimentaria moderna. La interacción coordinada entre las comunidades microbianas y las condiciones de cultivo permite dirigir, controlar y rediseñar la transformación de los carbohidratos y de otros sustratos alimentarios, determinando así la calidad, estabilidad y características finales de los productos que llegan al consumo humano.

Bacterias Ácido Lácticas (BAL)

Este principio constituye el eje fundamental sobre el cual se sustenta gran parte de la producción alimentaria tradicional e industrial a nivel mundial, especialmente en la industria láctea, así como en la elaboración de encurtidos de tubérculos, vegetales fermentados y productos cárnicos madurados, como embutidos y carnes curadas sometidas a procesos de ahumado y conservación. Estas bacterias ácido-lácticas, microorganismos anaerobios o microaerófilos de gran importancia metabólica, actúan como verdaderos motores biológicos dentro de los sistemas fermentativos. Su actividad determina de manera decisiva las condiciones del medio, ya que regulan variables críticas como el pH, la disponibilidad de nutrientes y la producción de metabolitos secundarios, factores que pueden favorecer o limitar drásticamente la estabilidad del ecosistema microbiano y el éxito del proceso productivo (P. Chen, 2021).

Mediante la fermentación de azúcares solubles, estas bacterias producen grandes cantidades de ácido láctico, lo que provoca una disminución significativa del pH del medio. Esta acidificación genera un ambiente hostil para microorganismos alterantes y potencialmente putrefactivos, limitando su crecimiento y favoreciendo la estabilidad microbiológica del sistema. Gracias a este efecto protector, se establece un entorno seguro indispensable para procesos como la coagulación de la leche y la maduración adecuada de quesos, donde la calidad sensorial y la inocuidad dependen en gran medida de este equilibrio biológico (Xin & Qiao, 2025). Dentro de este grupo destacan géneros ampliamente utilizados en la industria alimentaria como *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Streptococcus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus* y *Weissella*. Cada uno de ellos aporta funciones específicas, desde la producción de ácido láctico y compuestos aromáticos hasta la síntesis de exopolisacáridos que mejoran la textura, estabilidad y propiedades sensoriales de los alimentos fermentados.

DATO CURIOSO *"Lactobacillus en el espacio"* Tan cruciales son las bacterias ácido-lácticas para la salud y la conservación alimentaria, que la Estación Espacial Internacional (ISS) ha sido sede de experimentos para fermentar alimentos en microgravedad utilizando estas bacterias.

Levaduras

Las levaduras constituyen un grupo de hongos eucariotas unicelulares, generalmente de morfología esférica u ovalada, que poseen una notable capacidad metabólica para transformar compuestos orgánicos mediante procesos fermentativos. Su maquinaria celular les permite, en ausencia o limitación de oxígeno, desviar el metabolismo desde la respiración aerobia hacia la fermentación alcohólica, proceso mediante el cual convierten azúcares en etanol y dióxido de carbono. Como resultado, se generan concentraciones significativas de etanol, un compuesto volátil de gran importancia industrial en la producción de bebidas fermentadas y otros alimentos, junto con la liberación de dióxido de carbono, responsable de fenómenos como la expansión de masas panificables y la formación de burbujas en distintos productos fermentados. Esta capacidad convierte a las levaduras en microorganismos fundamentales dentro de la biotecnología alimentaria y de numerosos procesos industriales.

Desde el Egipto antiguo, las levaduras han desempeñado un papel fundamental en la elaboración de pan, gracias a su capacidad para producir dióxido de carbono durante la fermentación de azúcares. Este gas queda atrapado en la red proteica del gluten presente en la masa, generando la expansión y esponjosidad características de los productos panificados. Por esta razón, las levaduras han sido consideradas protagonistas esenciales en la historia de la panificación. Entre ellas, *Saccharomyces cerevisiae* representa la especie más importante y ampliamente utilizada a nivel mundial, tanto en panificación como en la producción de bebidas

fermentadas. Su eficiencia metabólica, estabilidad y capacidad fermentativa la convierten en el principal microorganismo de interés industrial.

Sin embargo, en la enología moderna se reconoce cada vez más el valor de las fermentaciones mixtas y espontáneas, donde participan diversas levaduras no-*Saccharomyces* que aportan mayor complejidad sensorial. Entre ellas destacan *Hanseniaspora*, *Pichia*, *Candida*, *Kluyveromyces* y *Brettanomyces*. Estas especies pueden intervenir como cofermentadoras en mostos de uva, aportando notas aromáticas especiadas, ahumadas, amaderadas y matices más complejos que difícilmente se alcanzan mediante el uso exclusivo de cultivos puros estandarizados de laboratorio (Zhang et al., 2026).

Hongos Filamentosos y Microbiotas Especializadas

Aunque las levaduras suelen ocupar el protagonismo visible en muchos procesos fermentativos, la transformación inicial de matrices alimentarias complejas depende, en gran medida, de la acción de los hongos filamentosos o mohos. Estos microorganismos, caracterizados por su crecimiento micelial ramificado y su elevada capacidad colonizadora, actúan como verdaderos agentes estructurales de degradación sobre sustratos de alta complejidad, como cereales secos, granos sometidos a fermentación sólida o matrices densas ricas en proteínas y lípidos, como los quesos madurados. Su principal ventaja biotecnológica radica en la secreción de enzimas extracelulares hidrolíticas, como proteasas, lipasas y amilasas, capaces de descomponer progresivamente macromoléculas complejas en compuestos más simples y biodisponibles. Esta hidrólisis controlada libera aminoácidos, péptidos, ácidos grasos y otros metabolitos que no solo facilitan la acción posterior de otros microorganismos fermentativos, sino que también contribuyen directamente al desarrollo del aroma, sabor, textura y valor funcional del alimento.

Géneros como *Aspergillus* y *Penicillium* son fundamentales en este tipo de procesos. Aunque no participan principalmente en fermentaciones sumergidas

clásicas, desempeñan un papel esencial en etapas preparatorias y de maduración, como ocurre en la producción de koji y en numerosos quesos madurados. Sin la acción enzimática de estos hongos sobre proteínas, lípidos y carbohidratos complejos, productos como el queso madurado o los fermentados tradicionales asiáticos perderían gran parte de su complejidad sensorial y de su valor biotecnológico (Alfaia et al., 2024).

Adicionalmente, se unen en segundas etapas los taxones de Bacterias Acéticas letales y combativas (como *Acetobacter*, artífices del vinagre concentrado picante). Paralelamente surgen grupos extremófilos termorresistentes formadores de pesadas esporas acorazadas mortales de *Bacillus spp.* para fermentaciones alcalinas cáusticas en la soya viscosa (Arya et al., 2025). También es importante considerar el papel de los microbiotas halófilos, comunidades microbianas adaptadas a ambientes de alta salinidad que participan activamente en diversos procesos tradicionales de conservación y maduración de alimentos. Estos microorganismos extremófilos poseen mecanismos fisiológicos que les permiten sobrevivir y desarrollarse en condiciones hipersalinas donde muchas otras especies no pueden persistir.

En productos pesqueros salados, ahumados o sometidos a procesos prolongados de curación, estas microbiotas desempeñan una función protectora y transformadora. Dentro de ellas, destacan grupos bacterianos como los estafilococos halotolerantes, capaces de contribuir a la estabilidad microbiológica del sistema, al desarrollo de compuestos aromáticos característicos y al control de microorganismos alterantes. Su presencia resulta especialmente relevante en productos tradicionales de maduración prolongada, donde la sal actúa no solo como conservante, sino también como factor selectivo que favorece el establecimiento de comunidades microbianas especializadas. Resulta notable observar cómo las comunidades microbianas, tanto procariontes como eucariontes microscópicos, organizan y dominan sus respectivos hábitats

mediante complejas redes de interacción biológica. Estos microorganismos no actúan de forma aislada, sino que establecen relaciones sintróficas, intercambios genéticos, mecanismos de inhibición mutua y cooperaciones nutricionales que les permiten adaptarse, persistir y mantener el equilibrio funcional de sus ecosistemas (Xin & Qiao, 2025). A través de estas interacciones dinámicas y continuas, los microorganismos moldean de manera profunda los procesos biotecnológicos que sustentan gran parte de la producción alimentaria moderna. Cada fermentación, maduración o proceso de conservación es el resultado de una compleja organización biológica invisible, pero esencial, que determina la calidad, seguridad y características sensoriales del producto final. Así, detrás de cada alimento procesado que llega al consumo cotidiano, existe una sofisticada obra de ingeniería microbiana que refleja la enorme relevancia de estos sistemas vivos en la industria y en la vida diaria.

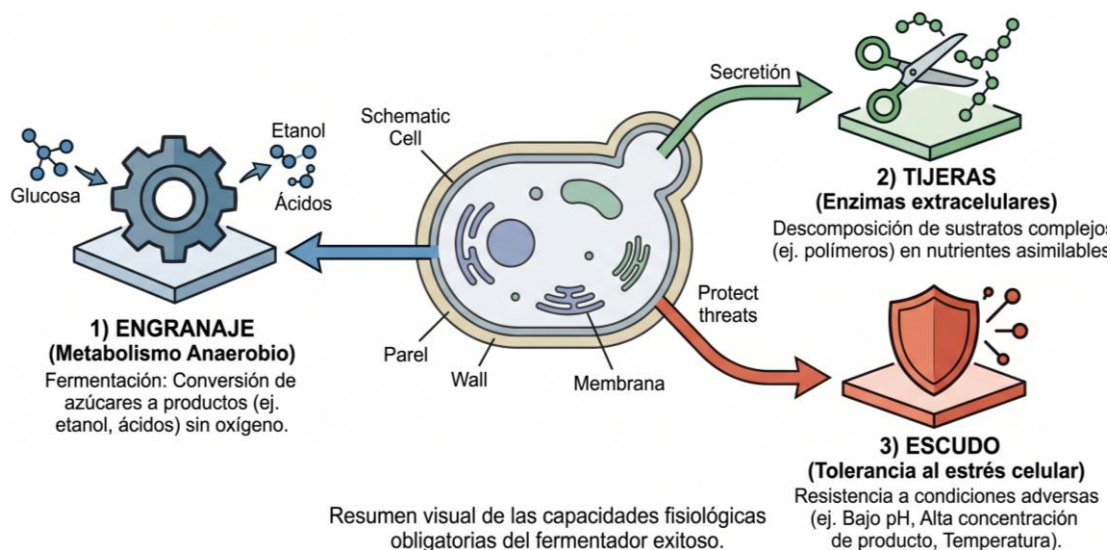
Fisiología de la Fermentación: Más allá del ácido

Es insuficiente definir a la maquinaria celular fermentativa alegando llanamente que “producen ácido”. Si todos los microorganismos de la biosfera poseen enzimas y metabolizan nutrientes de algún tipo, resulta intrigante por qué solo un puñado selecto de ellos es genuinamente capaz de transformar materias primas crudas en alimentos fermentados estables, biológicamente seguros y sensorialmente complejos. La respuesta no reside en una única propiedad milagrosa, sino en un equilibrado conjunto de rasgos fisiológicos que, actuando de manera rigurosamente integrada, permiten al microorganismo colonizar el alimento, dominar por completo el ecosistema y redirigir toda su química interna a favor.

El metabolismo energético es el primer pilar. La fermentación es, en esencia, una audaz estrategia de obtención de energía en entornos donde la ausencia de

oxígeno ahogaría a otros. Los microorganismos fermentadores poseen fluidas rutas metabólicas, como el glicólisis y diversas rutas fermentativas anexas, que aseguran la vital reoxidación del NADH generado, permitiendo la continuidad del flujo metabólico. Según Nout (2023), dependiendo de la especie y su dotación genética, el compuesto intermediario (piruvato) puede convertirse en ácido láctico en una fermentación pura, transformarse en etanol y CO₂ de índole alcohólica, virar a ácido acético o incluso generar compuestos netamente alcalinos como el amonio en las muy agresivas fermentaciones proteolíticas. Esta diversidad dictamina bioquímicamente el perfil sensorial y la vida útil resultante. En matrices como cereales fermentados, la capacidad de hidrolizar primero el almidón y utilizar los azúcares atrapados liberados es crucial. En agudo contraste, en matrices ricas en proteínas densas, como el pescado curado o la carne madurada, la fermentación exige una intensísima degradación proteica inicial que termina generando una valiosa lluvia de aminoácidos y compuestos volátiles azufrados sumamente aromáticos (Sharma et al., 2022).

Ilustración 2.1 Capacidades fisiológicas del fermentador exitoso



Nota. La imagen resume tres capacidades esenciales de un microorganismo fermentador exitoso: el metabolismo anaerobio para transformar azúcares en productos como etanol y ácidos, la secreción de enzimas extracelulares para

degradar sustratos complejos y la tolerancia al estrés celular frente a condiciones adversas como pH bajo, temperatura elevada y alta concentración de productos.

Un alimento crudo no ofrece moléculas simples listas para ser fermentadas de inmediato. En la naturaleza, la energía se halla acorazada formando macromoléculas: polisacáridos intrincados, proteínas insolubles y lípidos indigeribles. Por ende, el potencial enzimático extracelular marca la verdadera línea de partida. La capacidad vital de eyectar al medio fuertes proteasas hidrolíticas, amilasas cortantes, lipasas formidables y delicadas glicosidasas permite desarmar la fortaleza liberando, recién entonces, los verdaderos sustratos fermentables y precursores aromáticos ocultos. En la maduración controlada de carnes de alta gama, por ejemplo, los complejos enzimáticos de origen fúngico modifican las proteínas miofibrilares rígidamente asociadas, alterando la textura natural por una suavidad refinada (Ostrowski et al., 2026). De forma análoga, levaduras dotadas de genomas productores de celulasas consiguen expandir sus horizontes catabólicos sobre enjutos subproductos agrícolas, como el salvado de trigo fibroso. Así, la fermentación exitosa nunca comienza realmente produciendo ácidos, comienza inequívocamente con la llave correcta para acceder al sustrato.

Paradójicamente, la tercera característica recae sobre poder tolerar el estrés acumulativo. Los potentes metabolitos protectores secretados –la agresiva caída del pH, la acumulación tóxica de etanol, la asfixiante presión osmótica incitada por la sal y el azúcar, añadidos a los letales compuestos fenólicos del medio– forjan a corto plazo un ambiente complicado. Las levaduras y bacterias seleccionadas presentan formidables mecanismos de resistencia fisiológicos. Estos escudos sistémicos incluyen modificaciones de saturación protectora en la barrera lipídica celular, acumulación pasiva de solutos compatibles intercelulares que impiden el reventón de la turgencia ósmica frente al medio, y la masiva sobreexpresión de proteínas de choque térmico y enzimas antioxidantes limpiadoras.

Investigaciones modernas comprueban de manera asombrosa cómo variaciones sutiles, como el aumento de los niveles de prolina libre intracelular logran evadir la agresión causada por taninos oscuros inhibitorios, incrementando notoriamente la resistencia total y sobrevivencia poblacional de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* bajo ataques extremos (Lin et al., 2022). Desprovistos de estos factores resilientes innatos, la colonia fermentativa sucumbiría abrumada e intoxicada ante sus propios frutos.

Finalmente, el fermentador debe erigirse en dominador hegemónico produciendo potentes antimicrobianos mientras pacta redes de interacciones cooperativas de beneficio mutuo («cross-feeding»). Las comunidades microbianas interactúan constantemente en una estira y afloja de favores químicos letales; una cepa láctica de rápida diseminación regala valiosos aminoácidos rotos al torrente que fungen como señales despertando vigorosamente levaduras aletargadas en un mosto frío, mientras las levaduras aportan en retorno cuantiosas y generosas vitaminas esenciales del complejo B, sin las cuales la colonia láctica se encontraría severamente subnutrida (Cheng et al., 2025).

Estos cruces y atajos químicos expanden los confines biológicos de las rutas convencionales preestablecidas. Otorgan gran versatilidad metabólica sobre escenarios adversos permitiendo, por poner un caso reciente de ingeniería agronómica, la brillante ideación de estrategias conjuntas cooperativas encadenadas de carácter enzimático-levaduriforme para exprimir vinos exquisitos con significativamente mucha menor graduación alcohólica etílica por designio metabólico (Del-Bosque et al., 2026). La conclusión ecológica que nos deja este compendio fisiológico es terminante: solo organismos investidos con esta múltiple destreza consiguen adueñarse de la materia y convertir ese entorno asilvestrado y agreste, en un dominio perfectamente funcional para el consumo mundial.

DATO CURIOSO *"El lado amigable del estrés"* Para las levaduras, el ambiente azucarado y alcohólico de una cuba de vino en fermentación extrema es tan estresante bioquímicamente como lo es respirar humo espeso para nosotros. Para sobrevivir, sus células se "blindan" cambiando en minutos toda la grasa de sus propias membranas.

Idoneidad Tecnológica: El Criterio de Selección

Un error conceptual importante en el procesamiento de alimentos consiste en asumir que el simple hecho de que un microorganismo patógeno sea metabólicamente capaz de fermentar un sustrato lo convierte automáticamente en un candidato viable para su aplicación industrial. La capacidad fermentativa, por sí sola, no constituye un criterio suficiente para considerar útil o segura una cepa dentro de un proceso productivo. Esta idea se encuentra completamente alejada de la realidad de la industria alimentaria moderna, donde la aptitud de un microorganismo para uso tecnológico no depende únicamente de su capacidad catabólica, sino, de manera prioritaria, de su inocuidad y del control riguroso del riesgo biológico asociado a su consumo. La seguridad alimentaria exige una evaluación integral que considere no solo el rendimiento metabólico del microorganismo, sino también su impacto potencial sobre la salud humana y la garantía de que su utilización no represente un peligro para el consumidor.

El Riesgo Patogénico y Productores Genómicos Toxigénicos

La gran mayoría de la diversidad microbiana existente en el planeta ha sido históricamente excluida de las aplicaciones alimentarias e industriales debido a las estrictas normativas contemporáneas de seguridad y control sanitario. Esto deviene, por lógica pura de biopreservación de nuestra especie, pues cualquier alimento no resulta en sí mismo apto para el consumo humano. El alimento constituye la vía directa de ingreso de microorganismos y metabolitos al sistema digestivo humano, donde interactúa de manera estrecha con el microbiota intestinal y con los mecanismos inmunológicos del huésped. Por esta razón,

cualquier indicio de factores de virulencia o genes asociados a patogenicidad representa una señal de alerta prioritaria dentro de los sistemas de monitoreo y control microbiológico.

Microbios altamente letales como *Salmonella*, la infame sepa colonizadora mortal *Escherichia coli* serotipo O157:H7 invasiva sangrante, *Listeria monocytogenes*, la silenciosa *Shigella* y por sobremanera el devastador aviar *Campylobacter* portan la capacidad incuestionable de detonar fulminantes cuadros severos mortales de altísima transmisión epidemiológica por vector trófico (Jayan et al., 2025). Estos microorganismos pueden presentar factores de virulencia altamente relevantes, como adhesinas que facilitan la colonización e invasión de tejidos, sistemas de secreción especializados capaces de liberar toxinas y efectores patogénicos, y mecanismos que les permiten evadir o subvertir las defensas inmunológicas del hospedero. Entre estas estrategias se incluye la capacidad de resistir la acción de células defensivas como los macrófagos, favoreciendo así su persistencia y su potencial patogénico.

Existen grupos aparentemente pacíficos biológicamente en la matriz que ocultan, no obstante, una insidiosa capacidad letal: la síntesis oculta silente de potentes toxinas de diseño, metabolitos neurotóxicos y eméticos excretorios. Resultan letales en su inofensividad aparente visual. Referencias terroríficas de parálisis letal como la colosal neurotoxina fulminante exudada generosamente del invasor anaeróbico *Clostridium botulinum* o inclusive las potentes toxinas irritantes eméticas fulminantes del esporulado resistente *Bacillus cereus*, destruyen irreversiblemente cualquier esperanza comercial incipiente y con suma sensatez, el criterio técnico rechaza cualquier lote biológico con sospechas (Zucko et al., 2021). Resulta ineludible rechazar todo agente con la mínima dotación toxigénica en potencia presente detectable inclusive en genomas.

Además, los genomas microbianos poseen una elevada capacidad de intercambio horizontal de información genética, lo que favorece la transferencia

de elementos como genes de resistencia antimicrobiana, plásmidos y transposones entre distintas poblaciones bacterianas. Este fenómeno puede facilitar la diseminación de características no deseadas dentro de ecosistemas microbianos complejos, incrementando los riesgos sanitarios y dificultando el control microbiológico. Por esta razón, los marcos regulatorios actuales exigen que los cultivos utilizados en la industria alimentaria presenten una estricta estabilidad genética y un perfil de inocuidad claramente demostrado. La ausencia de factores de virulencia, la no transmisión de genes de resistencia y la predictibilidad de su comportamiento biológico constituyen requisitos fundamentales para su aprobación y uso seguro en procesos industriales.

Criterios Fisiológicos y Operativos

No todos los microorganismos que habitan en las masas orgánicas son nocivos para la salud humana sin embargo no son adecuados ante las líneas operativas estandarizadas mundiales, estos conocidos comúnmente como organismos de deterioro. Descomponen los productos mediante aminas biógenas, compuestos derivados del metabolismo de aminoácidos que pueden afectar tanto la calidad sensorial como la seguridad del producto. De igual forma, perfiles oxidados volátiles que degradan la calidad y aceptación (Odeyemi et al., 2020). Sumados íntimamente se acoplan al listado las esporas ultra-resistentes residuales, sobrevivientes a choques térmicos industriales (Martín-Miguélez et al., 2025). Además, muchos microorganismos poseen la capacidad de formar biopelículas persistentes sobre superficies de procesamiento, incluso en materiales considerados altamente higiénicos como el acero inoxidable (Pramana et al., 2024).

Los criterios que permiten distinguir una cepa verdaderamente útil de otras biológicamente poco viables para la industria alimentaria se basan en su idoneidad tecnológica, su estabilidad funcional y, de manera fundamental, en su inocuidad. Una cepa solo puede considerarse apta para uso industrial cuando

demuestra la capacidad de mantener un alto rendimiento productivo bajo condiciones de proceso exigentes, como exposición prolongada a medios ácidos, variaciones térmicas o limitaciones nutricionales, sin perder su eficiencia metabólica ni su capacidad de síntesis del producto de interés.

Además, debe producir el metabolito objetivo de forma rápida, consistente y económicamente rentable, utilizando la menor cantidad posible de sustrato y manteniendo la estabilidad de ese rasgo a lo largo del tiempo, incluso frente a procesos naturales de adaptación o mutación. Según Sarmah y Deka (2025) y Pereira et al. (2024), esta combinación de resiliencia fisiológica, robustez termodinámica y constancia metabólica constituye la base de su verdadera competitividad industrial.

A ello se suma un requisito indispensable: la certificación de inocuidad reconocida por los marcos regulatorios internacionales. Como señalan Pak et al. (2025) y Xavier (2024), el reconocimiento bajo estatus como GRAS (*Generally Recognized as Safe*) o sus equivalentes normativos garantiza que la cepa ha sido evaluada rigurosamente y puede emplearse con seguridad en alimentos destinados al consumo humano. Esta validación legal y científica constituye el fundamento de la confianza sanitaria y comercial en la biotecnología alimentaria moderna.

Taxonomía Funcional: Profundizando en las BAL

El amplio grupo de las Bacterias Ácido-Lácticas (comúnmente acrónimo «BAL») forman parte de los procesos de fermentación. Este grupo incluye una gran diversidad de microorganismos con morfologías distintas, desde bacterias bacilares hasta cocos agrupados en cadenas o racimos, lo que puede generar una aparente contradicción taxonómica al compartir una misma denominación general a pesar de sus diferencias estructurales.

Esta diversidad se explica porque la clasificación de las BAL no responde exclusivamente a una cercanía filogenética estricta basada en parentesco evolutivo, sino principalmente a una característica funcional común de gran relevancia industrial: su capacidad predominante para producir ácido láctico como principal producto metabólico durante la fermentación de carbohidratos. Es decir, más que un grupo definido únicamente por su linaje evolutivo, las BAL constituyen una agrupación funcional basada en una propiedad metabólica convergente de enorme importancia tecnológica. Esta producción de ácido láctico no solo representa la base de múltiples procesos fermentativos, especialmente en la industria láctea, sino que también constituye un mecanismo fundamental de conservación, estabilidad microbiológica y desarrollo sensorial en una amplia variedad de alimentos fermentados.

DATO CURIOSO *"La huella invisible"* En la leche cruda habitan de forma natural las BAL (Bacterias Ácido-Lácticas), provenientes de la ubre y el entorno. Estas bacterias son "micro fábricas" latentes esperando la temperatura ideal (cerca de los 37°C) para activarse y transformar la lactosa en ácido láctico.

Su rasgo particular es que conectan el motor metabólico de la vía fosfato mediante coenzimas NAD^+ esenciales que continúan quemando energía indefinidamente y asimilando azúcares exógenos densos. Esta independencia metabólica frente al oxígeno les otorga una importante ventaja adaptativa en ambientes líquidos, densos o de disponibilidad limitada de oxígeno, como ocurre en numerosos sistemas fermentativos industriales. Por ello, su eficiencia energética y su capacidad de crecimiento en condiciones anaerobias o microaerófilas explican gran parte de su éxito biotecnológico y su amplia aplicación en la producción de alimentos fermentados. (Wang et al., 2021).

En su fisiología profunda estas células minúsculas lucen envolturas protectoras complejas, tejidas íntimamente en robustos y macizos bloques de péptidoglicano. Esto hace que al revelarlas siempre se marquen en las placas como células púrpuras intensas, lo que indica su naturaleza Gram-positiva y su resistencia al alcohol aclarador puro frotado (De Jesus et al., 2022). De manera paralela, estas células no presentan capacidad de formar endosporas ni de desarrollar estructuras internas de resistencia, además de carecer de la producción de catalasa. En conjunto estas características ponen de manifiesto la limitada adaptación al metabolismo aerobio.

Dentro de la clasificación microbiológica, el orden Lactobacillales comprende una amplia diversidad de microorganismos, incluyendo géneros de morfología esférica como *Lactococcus* y formas dispuestas en cadenas características como *Streptococcus*. Asimismo, por su relevancia funcional y su aplicación en contextos biotecnológicos y de salud, suele asociarse de manera complementaria a *Bifidobacterium*, aunque este último pertenece filogenéticamente al grupo de las Actinobacterias, lo que evidencia un origen evolutivo distinto y separado de los verdaderos Lactobacillales.

Homofermentativas contra Heterofermentativas

Resulta necesario sumergirnos biológicamente dentro la dualidad que subyace y enriquece enormemente este grupo microbiano: la división metabólica interna fundamental que define su funcionamiento y organización fisiológica. ¿Por qué determinadas cepas producen exclusivamente grandes cantidades de ácido láctico durante su metabolismo fermentativo, sin generar de manera apreciable subproductos gaseosos como dióxido de carbono u otras burbujas visibles? En contraste, otras cepas desarrollan un metabolismo fermentativo más complejo, caracterizado por la liberación visible de dióxido de carbono, la producción de compuestos como ácido acético y, en menor proporción, alcoholes y otros metabolitos secundarios que aportan olores y sabores más intensos. Estas

diferencias se encuentran determinadas, a nivel molecular, por la dotación enzimática específica de cada microorganismo y por las rutas metabólicas citosólicas que regulan su proceso fermentativo fundamental.

Las bacterias ácido lácticas (BAL) homofermentativas se distinguen por un metabolismo altamente eficiente, caracterizado por una conversión rápida y directa de la glucosa a través de la vía Embden-Meyerhof-Parnas, eje clásico del catabolismo glucídico. Mediante esta ruta, una molécula de glucosa es escindida de manera sistemática para originar dos moléculas equivalentes de ácido láctico. Desde el punto de vista bioenergético, el proceso puede resumirse en términos precisos: por cada mol de glucosa metabolizada se obtienen, en balance neto, dos moléculas de ATP. Como consecuencia de esta orientación metabólica intensiva hacia la producción de ácido láctico, el pH del medio desciende con rapidez en un intervalo temporal reducido, lo que limita de forma eficaz la proliferación de microorganismos competidores o alterantes (Swetha et al., 2023). Entre los géneros representativos de este grupo se encuentran *Lactococcus*, *Pediococcus* y *Streptococcus*.

En contraste, dentro de la vía alternativa de las pentosas, la degradación de la glucosa sigue un destino metabólico bifurcado. En este caso, una fracción del carbono se transforma en lactato, mientras que la porción restante se canaliza hacia la síntesis de etanol o ácido acético, acompañada habitualmente por la liberación de dióxido de carbono (CO₂). El balance global característico de las BAL heterofermentativas puede expresarse del siguiente modo: 1 mol de glucosa produce 1 mol de lactato, 1 mol de etanol –o acetato– y 1 mol de CO₂, con una ganancia energética de únicamente 1 ATP por molécula de glucosa. Así, en términos de rendimiento celular, esta vía resulta menos eficiente que la homofermentativa, ya que genera solo la mitad del ATP.

No obstante, esa menor eficiencia energética adquiere una relevancia tecnológica considerable en el ámbito alimentario. El CO₂ producido contribuye

a la formación de porosidades internas u “ojos” en determinados productos lácteos y embutidos, mientras que el etanol y el acetato participan de manera decisiva en la configuración del perfil aromático, aportando notas volátiles y ácidas que enriquecen las propiedades sensoriales del alimento. De forma paralela, dichos metabolitos secundarios también favorecen la estabilidad microbiológica durante el almacenamiento. Dentro de este segundo grupo funcional destacan géneros y especies como *Leuconostoc*, *Weissela*, *Lactiplantibacillus brevis* y *Lentilactobacillus buchneri*.

Desde una perspectiva agroindustrial, estas diferencias metabólicas y enzimáticas se traducen en aplicaciones tecnológicas claramente diferenciadas. Por un lado, las BAL homofermentativas se emplean de manera preferente cuando se requiere una acidificación rápida y eficiente, como ocurre en la elaboración de yogur, en la coagulación acelerada de cuajadas destinadas a la producción quesera y en la obtención industrial de ácido láctico para usos diversos, incluidos desarrollos en bioplásticos de aplicación médica. Por otro lado, las cepas heterofermentativas son especialmente valoradas en fermentaciones mixtas, donde la generación de compuestos secundarios resulta crucial para incrementar la complejidad aromática y mejorar la estabilidad de los productos. Su importancia es particularmente notable en fermentados vegetales, bebidas tradicionales efervescentes y procesos de ensilaje, en los que contribuyen de manera significativa a la conservación del valor nutricional del forraje.

Relevancia Genérica en Ecosistemas Alimentarios

En la naturaleza abrumadora infinita e indomable, no es un hecho trivial constatar que no todas las variables bacterias ácido-lácticas de la tierra convergen e intervienen promiscuamente ni por una remota y fortuita casualidad o simpleza equilibrada estadística equiparable dentro de los exigentes ecosistemas puros constituyentes de las distintas calidades de matrices y sustratos alimenticios mundiales. Ocurre invariablemente a ciencia cierta una estricta exclusión; un

minúsculo, selecto y repetitivo olimpo de apenas un modesto número fraccionario de probados y robustos taxones microbianos genéricos se han consolidado indiscutiblemente conquistando por méritos puros y determinando ineludiblemente su hegemonía dominante y subyugante perpetua. Esto obedece ciegamente a que soportan tolerancias cáusticas imposibles ácidas, combaten sanguinariamente frente al desmesurado volumen colosal ajeno aplastante competidor hostil oportunista desbocado y, por si fuera poco, sintetizan a destajo asombrosamente incansables de noche o de día formidables redes moleculares ricas de compuestos estabilizadores característicos determinantes que cincelan íntegramente un inconfundible e intachable producto comercial exitoso comestible.

Destaca primordial y omnipresentemente *Lactobacillus sensu lato*; un amplísimo y fascinante paraguas aglutinador extenso, revisado arduamente mediante meticulosas técnicas biomoleculares recatalogadoras (arrojando ramales ahora conocidos de manera fina, pero un tanto aparatosa, como *Lactiplantibacillus*, *Lacticaseibacillus* o *Limosilactobacillus*). Portando inusitada pero eficiente pericia, toleran sal y acidez adaptándose colonizadores en nichos tan variopintos como la fiera costra o salmuera viva del repollo coreano exótico macerado al sol rojizo (kimchi) –frecuentemente avasallado de manera abrumadora y gloriosa por el ubicuo lactobacilo *Lactiplantibacillus plantarum*– o en matrices frías pálidas sutiles ricas lácteas con *L. casei* o su cuasi gemelo biológico sub-asociado indetectable pero infalible el asombroso *L. paracasei* moldeando enérgicos madurados grasos en Europa (Fitsum et al., 2025).

DATO CURIOSO “La gran división” Por décadas todos se llamaron *Lactobacillus*. Pero en 2020, un esfuerzo monumental de biólogos reordenó este inmenso grupo en 25 nuevos géneros. ¡Por eso ahora los científicos usan nombres casi impronunciables como *Ligilactobacillus* o *Fructilactobacillus*!

Lejos de los cultivos vegetales fibrosos duros o encurtidos sumergidos agresivos, un dúo lácteo intocable hegemónico ejerce el reinado incontestable en tinas lácteas tibias mundiales; el coloso termo resistente *Streptococcus thermophilus* ensamblado hombro con hombro de forma simbiótica, leal, asombrosamente y profundamente codificada, ligada eternamente e interdependiente simbióticamente en las factorías enlazadas junto a inseparables bacterias cilíndricas rígidamente abigarradas. Mientras unos rompen vorazmente la proteína gruesa en peptonas iniciales cortas, los otros asimilan rápidamente rindiendo subproductos valiosos al primer eslabón estimulándole infinitamente de este modo para acortar a casi un cuarto del tiempo el precipitado y aromático final del coagulo gelificante espeso amado yogurt.

La cronología biológica y el compás rítmico marcan inexorables las pautas. Secuencias rítmicas ordenadas temporalmente emergen maravillosas. Fases iniciales neutras débiles pero indispensables atraen cepas heterofermentadoras rústicas como el redondo *Leuconostoc* y las adaptables y voluminosas *Weissella*, instaurando acidez transitoria aromática primera generosa gaseosa. Tras desplomar amargamente el entorno logarítmicamente debajo de valores inescrutables biológicamente de tolerancia media en escala de pH a los rudos lactobacilos inflexibles asumen indudablemente por derecho absoluto el comando implacable para culminar triunfantes el milagro perennemente estable de preservación estática perpetua de larga data consumible. Por último y en modo peculiar para culminar un inigualable viaje celular y palatal del genio enólogo en botellas de rubíes, destaca sin reservas el intrépido y enrevesado cocobacilo minúsculo hiper-especialista vinícola conocido globalmente entre viñedos de burdeos como bendición suprema única *Oenococcus oeni*. Este organismo se encarga de manera asombrosa pacífica silente e indetectable a simple vista durante inviernos en toneles cerrados fríos de madera, de neutralizar sub-repticiamente todo el astringente y filoso exceso insoportable de ácido málico verde presente tras cosecha transmutándolo enzimáticamente despacio y

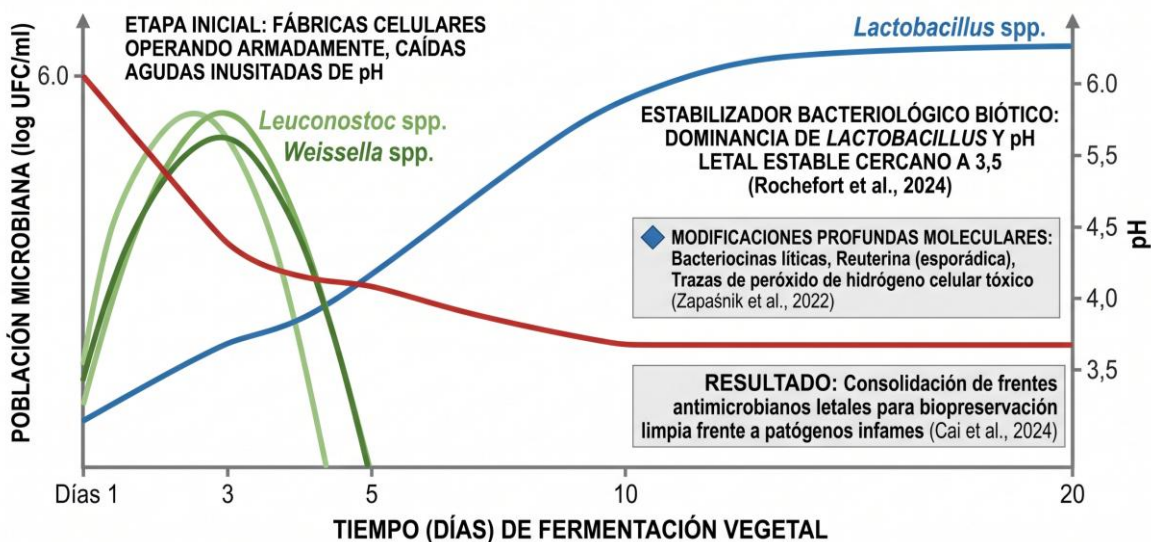
seguro por la amable de la suavidad de un aterciopelado resabio sedoso al paladar sofisticado conocido hoy sencillamente y buscado ansiosamente catalogada inmensamente bajo el rotulo de fermentación paralela especializada maloláctica .

La Funcionalidad Tecnológica Indispensable

Entender el absoluto imperio reglado incontrastable industrial que logran establecer inexorablemente estas familias celulares en sus distintos entornos forzados confinados a merced, es despojarnos mentalmente del inocente mito e imagen romántica de “diminutos obreros nadando”. Deben admirarse como fábricas reconfiguradoras operando armadamente, ejerciendo sobre cada macro estructura atacada las imprescindibles maravillosas bióticas modificaciones profundas funcionales moleculares transformadoras que logran erigirlas biotecnológicamente.

Reducción Ácida (Estabilizador Bacteriológico Biótico): Los valores alcanzan desplomes agudos inusitados en escalas vertiginosas, arrumbando a matrices vegetales a tocar registros letales inexplorables cercanos estables de 3,5 pH puro liso corrosivo pero amigable a los taninos en breves y eficientes jornadas productivas febriles intensas (Rocheft et al., 2024). Paralelamente la segregación armamentística es abrumadora: las famosas bacteriocinas líticas combinadas magistral esporádicamente de lado a letales subproductos limpios colaterales exógenos no deseables a vista simple pero funcionales tales la esporádica reuterina defensiva disolvente o trazas incesantes reactivas ardientes formadas por residual de peróxido de hidrógeno volátil celular tóxico (Zapašnik et al., 2022). Esto consolida frentes antimicrobianos letales para extender radicalmente horizontes de biopreservación limpia frente a patógenos infames devastadores de salud pública mundiales o meros descomponedores organolépticos nauseabundos desastrosos y destructores comerciales irrefutables abismales económicos (Cai et al., 2024).

Ilustración 2.2 Sucesión ecológica en la fermentación vegetal clásica



Nota. La imagen muestra la sucesión microbiana durante una fermentación vegetal, donde inicialmente predominan géneros como *Leuconostoc* y *Weissella*, seguidos por la dominancia de *Lactobacillus spp.*

Rediseño Molecular Modificador Físico y Sensorial: El amasijo pálido original inodoro crudo no permanece impasible. En ruta contraria, este ciego bombardeo catabólico, proteolítico intenso sostenido a fondo reaccionario enzimático natural desintegra incansablemente y recompone al vuelo por afinidad miles y miles diminutos valiosos e insolentes precursores enigmáticos estables, pariendo orgásmicamente cientos exóticos y muy excitantes aldehídos punzantes finos penetrantes, combinándolos esterificando en seductoras y lujurias florales volátiles delicadas, fraguando cetonas embriagadoras untuosas sutiles cremosas densas (Kouakou-Kouamé et al., 2023). El entorno táctil mismo reacciona gelificándose maravillosamente cuando viscosos polímeros extracelulares o exopolisacáridos inmensos voluminosos (EPS) surgen reticulares invisibles y elásticos abrazando ávidamente sin reservas al agua residual logrando emular texturas en reposterías, fundidas en pastas grasas puras blandas cremosas asombrosas impalpables estables y masas madre extensibles esponjosas sin claudicar nunca a las trampas abaratadoras vulgares repletas a tope sin

escrúpulos con tristes conservantes inertes emulsionantes inorgánicos sintéticos derivados ineficaces al final del día. Y todo transmutando hasta anular para purificarlas bio-activa nutricionalmente las irritantes indeseables tóxicas moléculas vegetales antinutricionales formidables crudas defensivas del reino verde natural consumible masivo cotidiano mundial en general.

Levaduras Fermentativas: Las Reinantes del Reino Fungi

Enmarcado en aparente asombrosa y desconcertante rebeldía bioquímica y despuntando magistral y ruidosamente en la cima se yerguen ufanas las levaduras productivas comerciales. Desdoblan y presentan reiteradas veces un misterioso y contradictorio "derroche incomprensible". Continúan infatigables excretando el escurridizo valioso y volátil codiciado compuesto (etanol puro de destilación) incluso a resguardo holgado cuando están rebosantes en abundancia excesiva sumergidas respiratoriamente en burbujeantes oxígenos vitalizadores saturadores circundantes sobrantes a presión que teóricamente biológicamente sugerirían la anulación u obviada prescindente e inmediata del mecanismo reductor fútil ineficiente.

El enigmático, asombroso y paradójico evento de aparente despilfarro inexplicable rige en ciencia la profunda y fascinante ley de la termodinámica microbiana industrial que honra al «Efecto Crabtree». Impulsa asombrosamente a cepas ascomicetas dominantes exclusivas especializadas robustas globales (ej. *S. cerevisiae*) o sub-ramales exóticos osmotolerantes recios (*Zygosaccharomyces* o cepas *Schizosaccharomyces*) a desviar caprichosamente adrede los cauces masivos estafalarios colosales excedidos de inmenso abrumador abundante ingreso masivo glucémico azucarado rápido, cerrando y silenciando biológicamente genéticamente bajo candado las poderosas exclusas eficientes respiratorias operativas formidables de origen mitocondrial pleno (Martins et al., 2020; Carrillo-Garmendia et al., 2022). Esto precipita obligatoriamente a operar

el recambio catabólico a tasas de revoluciones pasmosamente vertiginosas anaeróbicamente simuladas logrando crecimientos asombrosos colosales febriles exponenciales frente a una letargia en competencia general abrumada inoperante por las toxicidades efervescentes gaseosas agobiantes nacientes desprendidas.

El Propósito Dual y Efecto Protector de la Levadura

Dentro de la célula se acumula NADH lo que provoca que algunos procesos metabólicos se bloqueen, generando estrés celular. Para lograr subsanar este inconveniente la célula busca rutas alternativas, derivando rápidamente el problema al uso del intermediario base acetaldehído, dando como resultado alcohol etílico y una disminución del NADH. Al producir etanol, el NADH se convierte nuevamente en NAD⁺, que la célula necesita para seguir funcionando. En objetivo principal de es recuperar NAD⁺ porque solo así se logra seguir con la glucólisis (Imura et al., 2020).

Lo maravilloso reposa sobre el subproducto, ese alcohol disuelto concentrado resulta cumplir con una función protectora, ya que, elimina agentes extraños como bacterias competidoras que pueden dañarlas. Cabe recalcar que las levaduras presentan una resistencia alta al alcohol, lo que les permite dominar el entorno fermentativo. Esto permite que el proceso siga de manera continua (Tamama et al., 2024).

Saccharomyces cerevisiae: El Linaje Elegido

La predominancia universal de esta levadura en la fabricación de pan, así como en la producción cervecera y de vinos, hace de este uno de los hongos más apreciados a través de la historia en la humanidad. El estatus conferido a esta levadura en el ámbito industrial y artesanal deriva de sus características biológicas muy específicas. La principal de estas es la resistencia a condiciones adversas, ya

que, puede resistir a altas concentraciones de azúcar, cambios osmóticos y como ya se mencionó sobrevive de igual manera a concentraciones de alcohol elevadas (Casimiro et al., 2025).

Este microorganismo presenta una estrategia adaptativa de supervivencia basada en la producción y acumulación de metabolitos que le permiten competir eficazmente con otros organismos del entorno. Entre estos compuestos, el etanol cumple un papel relevante, ya que inicialmente actúa como un producto inhibitorio frente a microorganismos competidores. Posteriormente, en condiciones de escasez de nutrientes o cambios metabólicos desfavorables, puede ser reutilizado como fuente de carbono y energía, permitiendo su asimilación y contribuyendo a la supervivencia celular. Este mecanismo refleja una notable capacidad de adaptación fisiológica frente a condiciones ambientales adversas (Giannakou et al., 2020).

DATO CURIOSO *“El primer transgénico fue una levadura”* Debido a que *Saccharomyces cerevisiae* fue el primer eucariota en tener su genoma completamente secuenciado (1996), es el organismo base modelo de la biotecnología moderna. Si los humanos podemos lograr editar células avanzadas hoy, es gracias a que practicamos primero con esta levadura panadera.

Esta ya era utilizada en las antiguas civilizaciones como Mesopotamia o el antiguo Egipto, lo que incidió en que los seres humanos fueran perfeccionando la elección de las levaduras, logrando que con el tiempo aparezcan cepas más estables y eficientes. En el año de 1996 se logró secuenciar completamente su genoma, por lo cual, hoy conocemos su información genética completa y esto ha permitido que los científicos sean capaces de modificar las cepas mejorando su rendimiento en campos como la medicina y la biotecnología (Molina-Espeja, 2020; Štagoj & Podobnik, 2006).

El Abanico de Metabolitos Alcohólicos

Aunque se llame eufemísticamente reduccionista "fermentación alcohólica" no se genera exclusivamente etanol. Las levaduras generan distintos compuestos complejos, los cuales, son capaces de generar aromas y sabores muy variados, como si fuera un perfumista que crea fragancias (Stevens, 2020). Entre estos se encuentran los alcoholes superiores, ésteres, aldehídos, compuestos azufrados, ácidos grasos volátiles, fenoles, terpenos, dicetonas, entre los principales.

No es correcto pensar que las levaduras solo regeneran NAD⁺ convirtiendo acetaldehído en etanol. Sino que también producen CO₂, siendo el responsable de inflar la masa del pan y darle una textura esponjosa. Otro compuesto importante que genera la fermentación es el glicerol, este proporciona equilibrio químico interno a la célula especialmente en el balance redox. Además, debido a su viscosidad influye en la textura de las bebidas fermentadas como el vino.

Los ácidos orgánicos se encuentran en la lista de compuestos producidos por las levaduras durante la fermentación. Ejemplos de estos ácidos son el acético, el succínico y el pirúvico. Estos compuestos ayudan a controlar la acidez y mejoran el aroma y sabor final. De igual manera, se forman ácidos grasos como el hexanoico, octanoico y decanoico que son utilizados como la base para la formulación de compuestos aromáticos más complejos (Mbuyane et al., 2021).

Los alcoholes superiores—también conocidos como alcoholes de fusel en el ámbito industrial—aportan de igual manera complejidad aromática a las matrices fermentativas. Entre los más representativos están propanol, el isobutanol, el alcohol isoamílico y el 2-feniletanol, los cuales, son capaces de proporcionar desde notas secas hasta matices florales. Es importante saber que estos compuestos se generan principalmente por la degradación catabólica de los aminoácidos presentes en las proteínas de la matriz (utilizando rutas metabólicas como la vía Ehrlich). Adicionalmente, estos compuestos son precursores de compuestos aromáticos secundarios, de manera especial cuando reaccionan con ácidos orgánicos durante la fermentación.

Como resultado de esta condensación se forman ésteres volátiles responsables de notas frutales, florales y frescas en el perfil sensorial final del producto, entre los que destacan el acetato de etilo, asociado a aromas afrutados y ligeras notas de solventes suaves; el acetato de isoamilo, caracterizado por su aroma a plátano maduro; y el octanoato de etilo, vinculado con notas tropicales y florales, siendo este último especialmente relevante porque puede intensificar o disminuir la percepción de notas florales, tropicales y ácidas esperadas en bebidas fermentadas de alta calidad, como los vinos espumosos de guarda (Shen et al., 2026).

Tampoco se puede ignorar la influencia de las trazas de los compuestos volátiles minoritarios, ya que, estos consolidan parte fundamental del perfil aromático. Entre ellos, el acetaldehído destaca por su contribución a notas sensoriales intensas asociadas con manzana verde inmadura y matices frescos e incisivos (Osorio Alises et al., 2024). Por otro lado, los compuestos azufrados—como los mercaptanos— en distintas cantidades producen aromas pungentes y sensorialmente agresivos. En contraste, la liberación enzimática de terpenos y norisoprenoides contribuye positivamente al perfil sensorial, aportando notas florales, cítricas y resinosas que enriquecen el retrogusto de la bebida (Sieiro-Sampedro et al., 2020).

Ecología de Poblaciones en Levaduras

Cuando hablamos de fermentación muy lejos nos encontramos de condiciones de aislamiento absoluto, más bien tratamos con un entorno biológico dinámico. En este medio, las levaduras interactúan de manera constante con otros microorganismos, pudiendo ser manifestaciones tanto de cooperación como de competencia por recursos. Asimismo, pueden presentarse fenómenos de antagonismo microbiano, incluyendo la inhibición del crecimiento de otras especies mediante la producción de metabolitos específicos. Es de esta manera

que el proceso fermentativo se encuentra regulado por la comunicación celular, el intercambio de nutrientes y la competencia por sustratos.

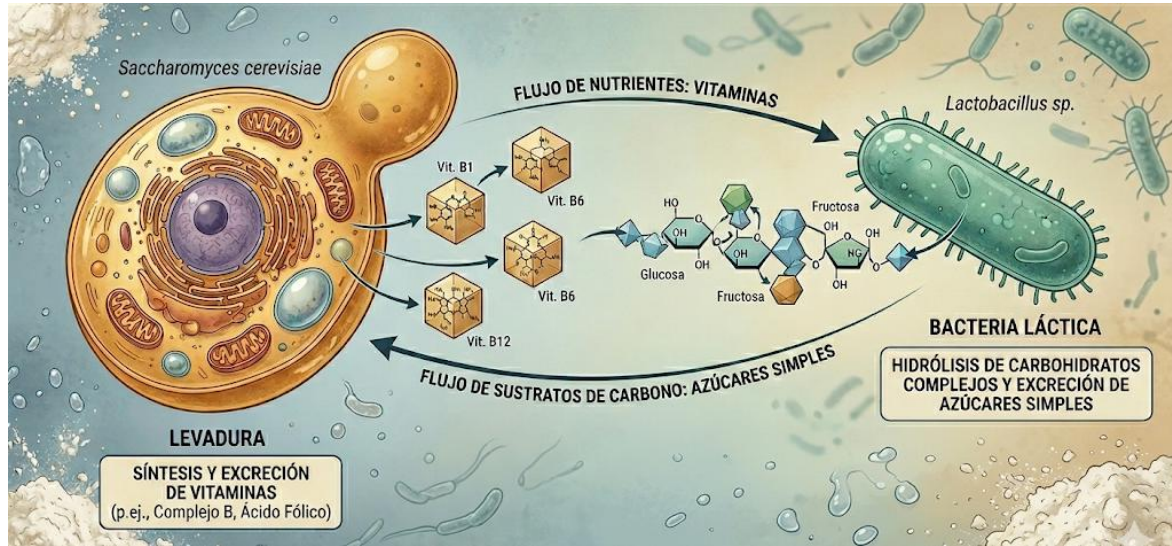
Entre los primeros mecanismos de cooperación microbiana se encuentra el intercambio nutricional directo (cross-feeding). En este, los microorganismos transfieren metabolitos de manera recíproca con el fin de mantener su actividad metabólica. Un ejemplo frecuente se observa en bacterias lácticas capaces de hidrolizar polímeros complejos, como almidones y maltosas, mediante enzimas extracelulares que liberan azúcares simples aprovechables por ciertas levaduras con menor capacidad hidrolítica. Este fenómeno ha sido ejemplificado en varias fermentaciones tradicionales, una de las más significativas es la producción de masas madre, donde especies como *Kazachstania humilis* establecen asociaciones funcionales con bacterias lácticas (Yu et al., 2025). De manera recíproca, las levaduras liberan vitaminas, aminoácidos y otros metabolitos esenciales que favorecen el crecimiento de bacterias auxotróficas con mayores requerimientos nutricionales.

Una vez que los recursos empiezan a escasear dentro de la matriz fermentativa las relaciones cooperativas se debilitan y surgen de manera prominente relaciones de competencia por los nutrientes. Las especies microbianas empiezan a competir por su permanencia en la matriz. Es así como, levaduras productoras de etanol, alcoholes superiores y ácidos grasos de cadena media, como el ácido octanoico, pueden ejercer un efecto inhibitorio sobre bacterias y otros hongos competidores debido a la toxicidad de estos metabolitos. Las relaciones de competencia favorecen la dominancia de determinadas especies, las cuales aprovechan de manera más eficiente los recursos residuales (Ma et al., 2025).

Algunas levaduras incluso son capaces de sintetizar toxinas extracelulares conocidas como *killer toxins*, las cuales actúan específicamente contra otros hongos sensibles presentes en el sistema. Estas toxinas alteran la integridad de la

membrana celular de los microorganismos competidores, provocando su inhibición o muerte y reforzando así la ventaja competitiva de las cepas productoras (Dmytruk et al., 2025).

Ilustración 2.3 Interacciones metabólicas en masa madre



Nota. La imagen representa la interacción metabólica entre la levadura *Saccharomyces cerevisiae* y bacterias lácticas del género *Lactobacillus*, destacando el intercambio de vitaminas y azúcares simples durante procesos fermentativos. Asimismo, se evidencia la cooperación microbiana en la síntesis de nutrientes y en la degradación de carbohidratos complejos.

Llegado a este punto cabe recalcar que la ecología microbiana en los procesos fermentativos no se limita a la mera interacción química, sino que este proceso presenta niveles de complejidad molecular elevados. Las interacciones microbianas no se limitan a la producción pasiva de metabolitos inhibidores, sino que también incluyen mecanismos de comunicación física y regulación celular directa. El contacto célula a célula puede generar señales que modulan la expresión génica, activando o reprimiendo regulones asociados con resistencia, adaptación y supervivencia frente a microorganismos vecinos.

Además, los microorganismos emplean sistemas de comunicación química colectiva conocidos como *quorum sensing*, mediante los cuales coordinan respuestas poblacionales dependientes de la densidad celular. A través de este mecanismo, pueden inducirse procesos como la formación de biofilms, la modulación de respuestas competitivas y la regulación sincronizada de rutas metabólicas relacionadas con la producción de compuestos aromáticos (Guo et al., 2025).

En este contexto, la biomasa sedimentada en las lías de fermentación constituye una estructura biológicamente activa y no un simple residuo inerte. Estas lías pueden organizarse en arquitecturas microbianas complejas que favorecen interdependencias funcionales entre levaduras, bacterias y otros hongos presentes en el sistema (Ogawa et al., 2020). Asimismo, estas interacciones no se limitan al ambiente fermentativo, sino que también se observan en ecosistemas más amplios, como el rumen de los herbívoros, donde comunidades microbianas complejas regulan procesos esenciales del metabolismo digestivo y del recambio de nutrientes (Desvignes et al., 2025; Valentini et al., 2024).

El Poder de los Mohos en Fermentaciones Alimentarias

Entre los microorganismos de relevancia biotecnológica se encuentran los hongos filamentosos, estos organismos pluricelulares presentan una alta capacidad de colonización y adaptación. Caracterizados por su crecimiento radial mediante hifas ramificadas, lo que les permite una invasión eficiente de diversos sustratos orgánicos. Además, poseen un amplio repertorio de enzimas extracelulares con actividad hidrolítica, lítica y degradativa, capaces de descomponer compuestos complejos presentes en el medio. Esta capacidad enzimática los convierte en agentes fundamentales dentro de los ciclos tróficos y de degradación de materia orgánica a escala ecológica. Los hongos filamentosos esporulantes son comúnmente conocidos como mohos, aunque esta denominación coloquial no refleja completamente su complejidad biológica y su importancia funcional.

Estos hongos poseen una capacidad superior para degradar sustratos sólidos de alta complejidad estructural, en comparación con las bacterias y levaduras. Las bacterias por un lado predominan sobre compuestos solubles, mientras que las levaduras en medios ricos en azúcares fermentables. Mientras que los hongos miceliales penetran matrices compactas de naturaleza lipídica y proteica. Te preguntarás ¿Qué característica es la que proporciona esta habilidad en el hongo? Pues este se debe a su crecimiento invasivo mediante hifas y a la producción de enzimas extracelulares especializadas que degradan proteínas, lípidos y otros polímeros complejos. Un ejemplo especializado de esto es el uso de las especies *Penicillium roqueforti* y *Penicillium camemberti* en la maduración de quesos (Gourama & Fung, 2024).

Otro ejemplo claro lo constituye el hongo *Aspergillus oryzae*, el cual, es fundamental en procesos fermentativos de origen asiático, principalmente en productos salinos y derivados de cereales. De igual manera, *Penicillium nalgiovense* es usado en la maduración de embutidos curados, contribuyendo a la protección superficial y al desarrollo aromático del producto. Es importante reiterar que en todos estos casos la calidad del producto final depende ampliamente de la actividad metabólica del micelio y de su capacidad para transformar profundamente la matriz original.

Degradación Estructural y Liberación de Tesoros

Los productos que en su transformación biológica utilizan materias primas vegetales complejas (tales como harina y leguminosas) requieren de la acción de hongos filamentosos para lograr productos fermentados de alto valor sensorial. Esto debido a la ya mencionada capacidad degradativa, lo que les permite convertir estos sustratos densos y de baja digestibilidad en matrices alimentarias más desarrolladas. Cuando se realizan estos procesos fermentativos se genera

una marcada intensificación del sabor umami, ya que, este se asocia a compuestos glutamínicos (Alaguthevar et al., 2025).

Este proceso depende principalmente de la actividad enzimática extracelular de los hongos, la cual actúa como un mecanismo de predigestión que descompone proteínas, polisacáridos y otros compuestos macromoleculares (Shruthi et al., 2020). En productos tradicionales como el tempeh, especies del género *Rhizopus* forman redes miceliales densas que colonizan el sustrato y generan una estructura compacta, porosa y funcionalmente estable. De manera similar, especies del género *Mucor* participan en procesos fermentativos donde, además de contribuir a la cohesión del alimento, favorecen la reducción de compuestos antinutricionales. Entre estos compuestos se encuentran los fitatos, moléculas capaces de secuestrar minerales esenciales y disminuir su biodisponibilidad, cuya degradación mejora el valor nutricional del producto final.

Esta primera etapa de degradación enzimática constituye la base para posteriores procesos de fermentación alcohólica. Esto se debe a que la hidrólisis de polisacáridos complejos permite la liberación de azúcares fermentables, los cuales, son necesarios para la sacarificación y la producción del etanol. Como ya podríamos anticipar, este procedimiento resulta particularmente importante en la transformación de sustratos ricos en almidón donde se presenta necesario convertir la matriz densa y harinosa en un medio apto para la fermentación líquida. En numerosas fermentaciones tradicionales orientales de tipo sólido o semisólido, esta función es desempeñada principalmente por hongos filamentosos especializados (Anupma & Tamang, 2020).

DATO CURIOSO *"El estómago externo"* A diferencia de nosotros que ingerimos los alimentos para poder digerirlos por dentro, los mohos invierten el proceso. Literalmente "vomitan" sus enzimas gástricas al exterior y luego absorben por sus paredes las moléculas finamente picadas como si de una sopa química se tratara.

Como se ha venido argumentando los hongos filamentosos se han constituido como una gran herramienta biotecnológica cuando de aprovechar residuos agroindustriales y lignocelulósicos se trata. Estos microorganismos son capaces de utilizar sustratos considerados desechos, como biomasa vegetal residual, subproductos forrajeros y materiales ricos en lignocelulosa, transformándolos en compuestos de mayor valor agregado. Mediante procesos de biotransformación enzimática e hidrólisis controlada, dichos residuos pueden convertirse en precursores proteicos, biomasa microbiana y metabolitos de interés industrial.

Géneros como *Neurospora*, *Aspergillus* y *Rhizopus oryzae* destacan por su elevada capacidad de degradación y su aplicación en sistemas biotecnológicos de valorización de residuos. En particular, *Aspergillus* y *Rhizopus oryzae* son ampliamente utilizados en biorreactores industriales debido a su eficiencia en la producción de enzimas, biomasa fúngica y proteína unicelular. Estas aplicaciones permiten generar fuentes sostenibles de proteína bioactiva y reducir simultáneamente la acumulación de residuos orgánicos, contribuyendo a estrategias de economía circular y seguridad alimentaria (Araújo et al., 2024; Parchami et al., 2021; Uwineza et al., 2024).

Sinfonía Enzimática y Modulación Organoléptica

La característica biotecnológica que resalta al usar los hongos filamentosos es el amplio espectro de enzimas extracelulares que secretan. Enzimas que poseen una alta capacidad catalítica con la capacidad de hidrolizar matrices complejas, que muchas veces son inaccesibles a los microorganismos procariontes. Entre las principales enzimas están las celulasas, glucosidasas, y proteasas (Intasit et al., 2021). Es específicamente esta actividad enzimática la que posibilita la degradación de polisacáridos estructurales y proteínas complejas. Habilitando los subsiguientes procesos fermentativos y facilitando la disponibilidad de nutrientes. Por otro lado, altera el perfil sensorial del producto final, favoreciendo

la formación de compuestos aromáticos más complejos, incluyendo ésteres y otros metabolitos volátiles responsables de notas afrutadas y fragancias intensas. De igual manera, contribuye a la transformación de compuestos fenólicos, polifenólicos y moléculas responsables de sabores amargos, ásperos o de baja aceptabilidad sensorial (de Souza Sevalho et al., 2025; W. He et al., 2026).

A nivel nutricional los hongos filamentosos constituyen un gran aporte al proporcionar la posibilidad de transformar matrices vegetales de bajo valor nutricional en productos con valor proteico, vitamínico y funcional. Durante su actividad metabólica estos generan biomasa enriquecida y compuestos bioactivos con potencial aplicación alimentaria, nutracéutica y biotecnológica. Además, se les considera “fábricas biológicas” ya que a más de producir elementos con valor nutricional también son capaces de producir metabolitos exóticos, pigmentos naturales y compuestos funcionales de alto valor agregado en sistemas de fermentación controlada (Wikandari et al., 2022; Molelekoa et al., 2021).

De igual manera, la revalorización de los residuos lograda a través de la acción enzimática de estos hongos promueve la sostenibilidad ambiental, permitiendo la reconversión biológica de dichos residuos. De esta manera, se generan ingredientes enriquecidos y compuestos con alto valor comercial. Diversos estudios han documentado este fenómeno en residuos provenientes de la industria alimentaria, como pan endurecido, bagazo cervecero y otras corrientes secundarias abundantes y problemáticas (Gmoser et al., 2020).

El valor biológico de estos aumenta cuando establecen consorcios funcionales mixtos con otros microorganismos. De manera particular, la interacción con bacterias ácido-lácticas permite el desarrollo de comunidades microbianas útiles a nivel biotecnológico, actuando como un motor intermedio los mohos degradan sustratos y liberan precursores químicos. Finalmente, las bacterias aprovechan

estos precursores para generar otros compuestos, logrando promover propiedades organolépticas específicas que no podrían ser alcanzadas de manera individual.

La Delgada Línea: Patogenicidad y Riesgo Fúngico

A pesar de lo beneficiosos que pueden llegar a ser los hongos en las matrices fermentativas existe un desafío importante relacionado al uso de estos. Debido a que dentro del mismo grupo fúngico coexisten tanto especies beneficiosas como especies peligrosas es necesario establecer un control estricto en la selección, manejo y aplicación tecnológica. Las especies peligrosas para la salud humana son aquellas capaces de producir sustancias tóxicas. Principalmente este riesgo se debe a la producción de micotoxinas (compuestos de alta estabilidad e impacto tóxico). Estos se caracterizan como metabolitos secundarios extracelulares producidos de forma natural por géneros fúngicos como *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium* (Akin et al., 2025).

La peligrosidad de las micotoxinas radica en su elevada resistencia a procesos tecnológicos como el calentamiento, los tratamientos ácidos y el ahumado, lo que dificulta su eliminación durante el procesamiento de alimentos. A diferencia de otros procesos de deterioro microbiológico, la presencia de micotoxinas no suele generar cambios evidentes en el olor, color o apariencia del alimento. Esta característica favorece su consumo inadvertido y aumenta el riesgo de exposición crónica en los consumidores. La exposición prolongada a micotoxinas puede provocar inmunosupresión, alteraciones metabólicas, daño sistémico y el desarrollo de enfermedades crónicas, incluido el cáncer. Entre las micotoxinas de mayor relevancia se encuentran las aflatoxinas, la ocratoxina A y la zearalenona, todas ampliamente estudiadas por su impacto toxicológico y su presencia frecuente en alimentos y productos lácteos (Y. He et al., 2024). En la siguiente tabla se proporciona los datos estadísticos sobre el peligro que representa el uso no controlado de los hongos.

Tabla 2.1 Características biológicas, impacto y peligrosidad de las micotoxinas en la cadena alimentaria

Concepto / Dato	Descripción e Impacto Científico
Impacto Agrícola Global	Según estimaciones de la FAO, entre el 25% y el 50% de los cultivos mundiales están contaminados con algún tipo de micotoxina, afectando la seguridad alimentaria y la economía global.
Resistencia Extrema (Termoestabilidad)	Las micotoxinas son moléculas sumamente estables. Algunas pueden soportar temperaturas de procesamiento de hasta 250°C. La cocción convencional, el horneado o la pasteurización no son suficientes para destruirlas.
El Peligro "Invisible"	A diferencia del moho visible, la toxina ya secretada en la matriz no altera las propiedades organolépticas. Un alimento (como harina o leche) puede verse, oler y saber perfectamente bien, pero estar altamente contaminado.
La Paradoja Fúngica	Un mismo género tiene "dos caras": Mientras <i>Penicillium roqueforti</i> es vital y seguro para crear el queso azul, su "primo" <i>Penicillium expansum</i> pudre manzanas y secreta <i>patulina</i> , una micotoxina neurotóxica.
Nivel de Peligrosidad (Carcinógenos)	La Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC) clasifica a las Aflatoxinas (especialmente la B1) en el Grupo 1. Esto significa que son sustancias confirmadas como altamente cancerígenas para el ser humano (principalmente cáncer de hígado).
Efecto de Bioacumulación	Si un animal de granja consume pienso contaminado, las micotoxinas (como la Aflatoxina M1) pueden metabolizarse y transferirse a subproductos como la leche o la carne, exponiendo indirectamente a los humanos.

Para lograr el control sobre la peligrosidad de estas especies resulta necesario establecer protocolos estrictos sobre las condiciones de fermentación. Entre los principales está el control sobre la temperatura y humedad, por ejemplo, una situación adversa se da en la fermentación del grano de café verde, realizada en tendales abiertos permitiendo el incremento de poblaciones de hongos oportunistas y potencialmente toxigénicos. De esta manera es evidente como a medida que disminuye el control sanitario en la producción aumenta el riesgo de proliferación de microorganismos esporulantes no deseados. Al peligro que compromete la toxicidad de ciertas especies fúngicas se suma la posibilidad de la contaminación cruzada con microorganismos patógenos como *Listeria* y *Clostridium* (Twarużek et al., 2021).

Por otro lado, la capacidad de las esporas fúngicas para generar problemas respiratorios debe ser considerada en el uso de equipos de protección. Ya que la exposición continua puede producir enfermedades como rinitis alérgica, asma ocupacional, afecciones bronquiales y, en casos graves, infecciones pulmonares, especialmente en personas inmunodeprimidas (González De Llano et al., 2025). Es por esto, por lo cual, en todo proceso fermentativo resulta necesario garantizar la ausencia de residuos toxigénicos y contaminantes invisibles que puedan afectar la salud humana o la inocuidad de biomásas destinadas a la alimentación animal (Fytsilis et al., 2024).



Ecología microbiana y control del proceso fermentativo

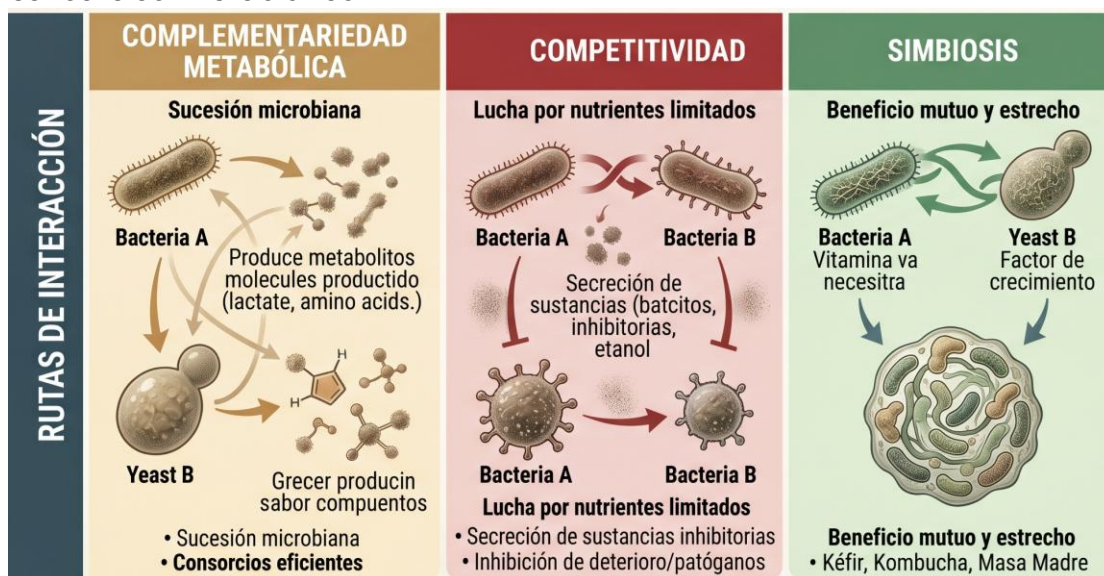
Parte III



La Red Inusitada y Abigarrada: Comunidades Microbianas

¿Los productos fermentados son espacios colonizados por una sola especie microbiana? La respuesta clara ante eso es un no. Los encurtidos, embutidos curados, bebidas fermentadas, etc., son ecosistemas dinámicos, altamente poblados e interdependientes a nivel biológico. En estos espacios interactúan de manera simultánea varios grupos microbianos (levaduras fermentativas, mohos filamentosos, bacterias, entre otros). Y es en estas interacciones que reside la ruta de evolución del sistema fermentativo, pudiendo estas manifestarse de distintas formas: complementariedad metabólica, competitividad o simbiosis.

Ilustración 3.1 Dinámica de las interacciones entre bacterias y levaduras en consorcios microbianos.



Nota. La imagen ilustra diferentes rutas de interacción microbiana: complementariedad metabólica, competitividad y simbiosis. Estas relaciones influyen en la disponibilidad de nutrientes, la producción de metabolitos y el equilibrio ecológico de los consorcios microbianos presentes en procesos fermentativos y ecosistemas biológicos.

Por otro lado, en cuanto a las poblaciones bacterianas se conoce que estas se encuentran sometidas a la acción de bacteriófagos, virus especializados que

infectan y destruyen células procariontes mediante procesos de lisis (Louw et al., 2023). La presencia de estos bacteriófagos influye directamente en la estabilidad de las fermentaciones, ya que puede alterar el equilibrio microbiano y limitar el desarrollo de colonias bacterianas esenciales para el proceso. Por ello, el estudio de los alimentos fermentados debe abordarse desde una perspectiva ecológica integral.

Mutualismo, Antagonismo y Sucesión

Las propiedades aromáticas, estructurales y organolépticas de los productos fermentados se transforman de acuerdo a la configuración de la comunidad microbiana presente en el sistema (de Jong et al., 2022). Uno de los mecanismos de mayor relevancia en las matrices fermentativas complejas es el mutualismo, por el cual, los microorganismos cooperan mediante el intercambio de nutrientes y metabolitos que favorecen su desarrollo conjunto, facilitando el acceso de sustratos entre especies.

Por otro lado, ante una cantidad de nutrientes limitados se establece una competencia entre los microorganismos, principalmente por los micronutrientes esenciales. Esta competencia genera una fuerte presión selectiva y determina la supervivencia de las poblaciones más adaptadas al entorno. En conjugación con esta competencia se encuentra el amensalismo, la cual se define como la relación en la que un microorganismo altera el medio mediante la liberación de metabolitos que resultan perjudiciales para otras especies (Gautam et al., 2025).

DATO CURIOSO "El origen lácteo del Premio Nobel" El revolucionario sistema de edición genética CRISPR (ganador del Nobel en 2020) no se descubrió en un laboratorio médico estudiando humanos, sino analizando bacterias de yogur (*Streptococcus thermophilus*) en tanques de fermentación láctea. Los científicos de la empresa de alimentos Danisco lo descubrieron mientras investigaban por qué algunas bacterias sobrevivían y otras morían ante los constantes ataques de bacteriófagos durante la producción comercial de yogur y queso.

La comunidad microbiana de cada sistema cambia en función de las condiciones fisicoquímicas del mismo. Es por esto por lo que, es imposible mantener un estado microbiológico estático, ya que, la actividad misma de los microorganismos hace que las condiciones cambien de manera dinámica. Esto da inicio con las especies pioneras, las cuales al colonizar el sustrato lo transforman mediante procesos de acidificación, consumo de oxígenos, y generación de metabolitos.

Ante estos cambios dinámicos varias especies iniciales son desplazadas o simplemente desaparecen debido a que no logran tolerar las modificaciones del entorno. Debido a esto los microorganismos que llegan a las etapas finales de la fermentación son los más resistentes y que han presentado una mejor adaptación. Estos organismos tardíos suelen ser responsables de la estabilización del sistema y de la definición de las características finales del producto.

La sucesión microbiana también se encuentra profundamente influenciada por las cepas ambientales presentes en cada región. Levaduras silvestres adheridas a frutas, superficies de madera o instalaciones tradicionales participan activamente en la inoculación inicial de muchos procesos fermentativos. Este microbiota local contribuye a la formación de características sensoriales únicas y constituye la base de lo que se conoce como terroir microbiano, especialmente valorado en productos como vinos y quesos artesanales (Peraza & Perron, 2022).

La Razón Evolutiva de la Pluralidad Microbiana

En el ámbito de la biotecnología, suele plantearse que la simplificación de los procesos productivos permitiría alcanzar un mayor control y una mejor eficiencia. Desde esta perspectiva, se busca reducir las interferencias cruzadas, los factores indeseados y las variables que afectan el desarrollo de los sistemas biológicos,

apostando por procesos de fermentación de monocultivo en los que se aísla un único producto dentro de un entorno considerado puro, controlado e inocuo. Bajo este enfoque, el mundo productivo se concibe como un escenario más simple, estable, rápido y fácil de manejar, en el que un modelo así diseñado parecería asegurar un éxito comercial sostenido, de alcance global y con riesgos mínimos. Esta visión, sin embargo, constituye el punto de partida para reflexionar sobre los alcances y limitaciones reales de los sistemas biotecnológicos actuales.

Podría elucubrar con total candidez ideal platónica inútil analítica teórica estéril la mente y el genio biotecnológico arrogante de que simplificando y purgado de interferencias molestosas ineludibles indeseadas cruzadas, arrinconando un producto a una exclusividad celosa y solipsista fermentación monocultivo purísima inmaculada en inofensividad e indefensa teórica controlada el mundo sería más simple analítico eficiente estable veloz controlable y exitoso de forma aplastante perenne total mundial comercial e inofensiva asombrosamente impecable aséptica.

Se ha documentado—salvo casos excepcionales—que los sistemas biológicos reales no funcionan bajo condiciones de aislamiento absoluto. Esto debido a que para lograr la transformación de sustratos complejos en productos con valor funcional se necesita de una red de relaciones bióticas. Un ejemplo claro de esto es la conversión de un sustrato fibroso y recalcitrante —como la lignocelulosa, principal componente de la biomasa vegetal y compuesta aproximadamente por un 35-50 % de celulosa, 20-35 % de hemicelulosa y 10-25 % de lignina— en un producto biológicamente valioso constituye un proceso de notable complejidad celular y metabólica. Su transformación requiere la acción coordinada de un amplio repertorio enzimático, que incluye celulasas, hemicelulasas, ligninasas, peroxidasas y lacasas, capaces de degradar, oxidar e hidrolizar compuestos estructuralmente diversos. Concentrar toda esta capacidad metabólica en una sola estirpe microbiana resulta inviable, puesto que el genoma de la mayoría de

bacterias oscila entre 2 y 6 Mb y el de los hongos filamentosos rara vez supera los 40 Mb, lo que limita el número de rutas y enzimas que pueden expresarse de manera simultánea sin comprometer la viabilidad citosólica.

Por consiguiente, los sistemas biológicos naturales se organizan mediante un ensamblaje colaborativo de redes metabólicas complementarias, conocido como *cross-feeding* o alimentación cruzada, en el que distintos microorganismos establecen relaciones de dependencia nutricional e intercambio de metabolitos indispensables para el funcionamiento del sistema. Estudios metagenómicos han demostrado que más del 80 % de los microorganismos presentes en suelos y rumen no pueden cultivarse de forma aislada, precisamente por su dependencia de metabolitos producidos por otras especies. En estas dinámicas, ciertas bacterias degradan compuestos complejos –como polisacáridos estructurales– para obtener nutrientes, liberando subproductos orgánicos como ácidos grasos de cadena corta, azúcares simples o alcoholes que sirven de sustrato para otros organismos, entre ellos diversos hongos; estos, a su vez, transforman dichos compuestos y liberan aminoácidos, vitaminas del complejo B y otros metabolitos esenciales que favorecen nuevamente el crecimiento bacteriano. Esta interacción recíproca permite completar rutas metabólicas inviables para una sola especie de manera aislada, evidenciando que un sistema biológico vivo no puede explicarse únicamente como la suma de sus partes, sino a partir de las propiedades emergentes derivadas de la interacción entre sus componentes. Tales propiedades no son completamente predecibles mediante modelos reduccionistas ni análisis aislados de cada organismo, e incluyen una mayor resiliencia frente a invasores, cambios de pH y fallas del sistema, así como una mayor robustez estructural y funcional de la comunidad biológica (Auchtung et al., 2025).

El Origen: Establecimiento de la Microbiota Inicial

La colonización inicial de un alimento en proceso de fermentación no es producto del azar ni resultado de una única vía de inoculación, sino la consecuencia de un proceso ecológico estructurado en el que múltiples microorganismos – procedentes del aire, las superficies de manipulación, los utensilios, la materia prima y el propio entorno de producción– entran en contacto con la matriz alimentaria, aunque solo una fracción reducida logra establecerse y proliferar. Se estima que, de los cientos a miles de taxones microbianos que pueden alcanzar un sustrato fermentable, apenas entre un 1 y un 5 % consigue colonizarlo de manera efectiva, debido a las condiciones fisicoquímicas del medio, como el pH, la actividad de agua, la concentración de sal, la disponibilidad de oxígeno y la presencia de metabolitos inhibidores. Desde una perspectiva ecológica, el inicio de la fermentación se sostiene en dos procesos complementarios: la dispersión pasiva, que determina la llegada de microorganismos desde fuentes diversas del entorno, y el filtrado ecológico, mecanismo selectivo que define cuáles de esos microorganismos logran tolerar las condiciones del sistema y, por tanto, integrarse activamente al sustrato. Esta interacción entre dispersión y selección configura, en última instancia, la estructura y funcionalidad de la comunidad microbiana fermentadora (Caffrey et al., 2024).

El principal componente microbiano inicial de una fermentación suele provenir de la propia materia prima empleada como sustrato, ya que, al sumergir, rallar o procesar un ingrediente base se libera y activa el nicho microbiano natural asociado a su superficie y estructura interna. Vegetales, leche y cereales albergan comunidades microbianas nativas que se han establecido evolutivamente en estrecha relación con dichos sustratos, alcanzando densidades que pueden oscilar entre 10^4 y 10^7 UFC/g en hojas frescas y entre 10^3 y 10^5 UFC/mL en leche cruda recién obtenida, lo que las convierte en una fuente fundamental para el inicio de los procesos fermentativos. Investigaciones sobre fermentaciones

vegetales, particularmente la del kimchi elaborado a partir de repollo en salmuera (2-5 % de NaCl), han demostrado que el éxito de la maduración depende en gran medida de los microorganismos nativos presentes en las hojas, el ajo, el jengibre y otros ingredientes iniciales (Song et al., 2020). Este fenómeno explica la aparición recurrente de géneros característicos como *Leuconostoc*, *Lactobacillus* y *Weissella*, bacterias ácido-lácticas que dominan las primeras fases del proceso gracias a sus adaptaciones fisiológicas para desarrollarse en ambientes osmóticos, con pH inferiores a 4,5 y abundantes compuestos fenólicos y azúcares fermentables propios de la matriz vegetal.

El producto fermentado no constituye un sistema aislado, sino que recibe una incorporación constante de microorganismos provenientes del entorno de elaboración. Las manos de los productores, los recipientes de madera, las superficies de trabajo y el aire del espacio productivo actúan como reservorios permanentes de dispersión microbiana, funcionando como fuentes continuas de inoculación ambiental que influyen directamente en la composición inicial de la comunidad fermentativa; se ha documentado, por ejemplo, que la madera porosa de los recipientes tradicionales puede albergar entre 10^5 y 10^7 UFC/cm² de bacterias ácido-lácticas y levaduras adaptadas, mientras que el aire de las salas de fermentación puede aportar entre 10^2 y 10^4 propágulos microbianos por metro cúbico. Antes incluso de que aparezcan los primeros signos visibles de fermentación, se desarrollan ya interacciones biológicas determinantes entre los microorganismos presentes (Caffrey et al., 2024).

Entre las prácticas tradicionales más relevantes para canalizar esta dinámica destaca el *back-slopping*, técnica que consiste en utilizar entre un 1 y un 10 % de un lote previamente fermentado para inocular un nuevo proceso, lo que permite transferir microorganismos ya adaptados y funcionalmente estables hacia una nueva matriz. De este modo, se favorece la continuidad ecológica, microbiológica y productiva del sistema fermentativo, al tiempo que se preservan las

características sensoriales, la estabilidad funcional y la identidad microbiológica propia del entorno local y de la tradición productiva.

DATO CURIOSO *“La memoria de la madera”* En muchas queserías tradicionales europeas y sudamericanas se prohíbe lavar a fondo las barricas o tinetas de madera de roble donde reposa la cuajada. Es en los diminutos e impermeables poros de esa vieja madera donde se esconden los microorganismos victoriosos de la semana pasada, que asegurarán el éxito de la producción de la semana siguiente.

En los sistemas fermentativos contemporáneos altamente tecnificados, las inoculaciones accidentales y la colonización microbiana espontánea suelen reducirse o eliminarse mediante el uso de cultivos iniciadores comerciales o *starters*, los cuales consisten en cepas seleccionadas, concentradas, liofilizadas y formuladas para garantizar estabilidad y reproducibilidad en el proceso productivo, con concentraciones típicas que oscilan entre 10^9 y 10^{11} UFC/g de producto liofilizado y dosis de inoculación que rondan el 0,01-0,02 % respecto al sustrato.

La inoculación controlada de estos microorganismos permite dirigir la fermentación de manera predecible y asegurar uniformidad microbiológica, sensorial y tecnológica, lo que resulta especialmente relevante en la producción industrial de alimentos pasteurizados –donde tratamientos térmicos como la pasteurización a 72 °C durante 15 segundos eliminan más del 99,9 % del microbiota nativo– y se exige una estandarización rigurosa, seguridad sanitaria y control de calidad constante. En tales contextos, los consorcios microbianos seleccionados dominan el proceso fermentativo y determinan sus principales características (Khorshidian et al., 2021).

No obstante, en sistemas menos intervenidos, como las producciones artesanales o semiartesanales elaboradas con materias primas crudas, las cepas comerciales

coexisten con microbiotas autóctonas presentes en el ambiente, las cuales pueden persistir, competir e interactuar con los cultivos iniciadores añadidos. Como consecuencia, el microbiota silvestre puede modificar, complementar o incluso alterar la trayectoria organoléptica inicialmente planificada, dando lugar a productos híbridos con perfiles aromáticos, texturales y funcionales únicos e irrepetibles, característicos del *terroir* microbiano de cada región).

Determinantes de la Composición Ecosistémica Comunitaria

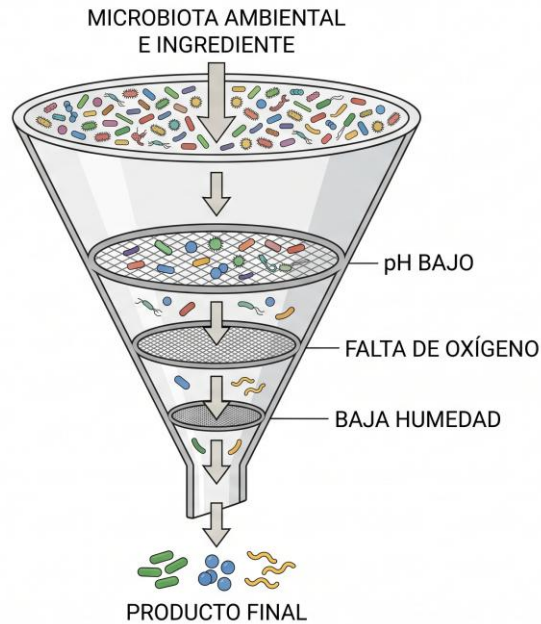
La comunidad microbiana presente en una cuba de maduración rara vez se define por relaciones simples, aisladas o completamente aleatorias, sino que su configuración final responde a una compleja red de interacciones biológicas, filogenéticas y metabólicas entre los distintos microorganismos involucrados. Estas relaciones comprenden procesos de cooperación, competencia, dependencia nutricional y exclusión, que determinan la estructura de la comunidad y pueden modificar la abundancia relativa de especies en órdenes de magnitud durante el proceso; estudios de secuenciación de amplicones 16S rRNA e ITS han mostrado que, partiendo de una diversidad inicial de 200 a 500 unidades taxonómicas operativas (OTUs), la maduración suele reducir la comunidad a entre 5 y 20 taxones dominantes.

De manera paralela, los factores abióticos –condiciones químicas como el pH (que puede descender de 6,5 a valores cercanos a 3,5-4,2), la concentración de sal (1-8 %), la actividad de agua, la temperatura (generalmente entre 12 y 30 °C según el producto) y la disponibilidad de oxígeno– actúan como filtros selectivos sucesivos que restringen la permanencia de los microorganismos menos adaptados y favorecen la supervivencia de aquellos con mayor capacidad de resistencia metabólica y fisiológica. Como resultado de esta dinámica selectiva, la comunidad final de maduración queda compuesta por un conjunto reducido de microorganismos dominantes –habitualmente entre el 1 y el 5 % de la diversidad

inicial– capaces de establecerse de manera estable y funcional dentro del sistema productivo.

El primer filtro selectivo en un proceso de fermentación está determinado por la naturaleza de la matriz alimentaria inicial, ya que la composición molecular, física y celular del sustrato define las condiciones primarias bajo las cuales los microorganismos pueden establecerse y desarrollarse. Los nutrientes presentes –azúcares simples como glucosa, fructosa y sacarosa, polisacáridos complejos como almidón, celulosa, hemicelulosa y pectinas, así como proteínas, lípidos y compuestos fenólicos– no se encuentran igualmente disponibles para todos los microorganismos, pues su aprovechamiento depende de la posesión de enzimas específicas que permitan su degradación y asimilación. Por ejemplo, mientras que las bacterias ácido-lácticas pueden metabolizar mono- y disacáridos con relativa facilidad, solo aquellas que expresan β -galactosidasas, amilasas, pectinasas o celulasas logran acceder a sustratos más complejos; se ha reportado que apenas un 10-20 % de las cepas presentes en una matriz vegetal posee el repertorio enzimático completo para degradar polisacáridos estructurales. Esta restricción genera una selección metabólica que favorece a los taxones capaces de utilizar eficazmente el sustrato disponible, mientras que los microorganismos carentes de tales capacidades enzimáticas quedan excluidos del proceso o presentan un crecimiento marcadamente limitado. En consecuencia, la composición del sustrato actúa como una barrera ecológica fundamental que condiciona la estructura inicial de la comunidad fermentativa (Bhattacharjee et al., 2020).

Ilustración 3.2 Dinámica de selección microbiana en el producto final basada en gradientes de pH, oxígeno y humedad.



Nota. La imagen representa el proceso de selección microbiana durante la fermentación, donde factores ambientales como el pH bajo, la falta de oxígeno y la baja humedad actúan como filtros ecológicos que favorecen el desarrollo de microorganismos específicos en el producto final.

La dinámica biológica de la fermentación no depende solamente de las interacciones microbianas, sino también de factores abióticos que actúan como determinantes selectivos fundamentales. Entre estos se incluyen variables físicas y químicas tan relevantes como la temperatura, la concentración de sal, la acidez y la disponibilidad de oxígeno, cada una capaz de modificar drásticamente el curso del proceso. El frío de las cámaras de maduración, que suele oscilar entre 4 y 14 °C según el producto, la elevada presión osmótica generada por salmueras con concentraciones de NaCl entre el 2 y el 12 %, y los ambientes anaerobios con valores de pH inferiores a 4,5 constituyen condiciones altamente restrictivas para una gran parte de los microorganismos.

Estos factores imponen una fuerte presión de selección que elimina rápidamente a los taxones menos tolerantes o metabólicamente inadecuados; de hecho, se ha observado que poblaciones entéricas como *Escherichia coli* o *Salmonella spp.* pueden reducirse en más de cinco órdenes logarítmicos en las primeras 48 a 72 horas del proceso fermentativo, debido a su sensibilidad a la acidez, la salinidad o la ausencia de oxígeno (Niu et al., 2024). En contraste, bacterias acidotolerantes y bien adaptadas a estas condiciones, como las del género *Lactobacillus*, encuentran un entorno especialmente favorable para colonizar, multiplicarse y dominar el proceso de maduración, llegando a representar entre el 70 y el 95 % del microbiota total en las fases avanzadas de la fermentación (Agostini et al., 2021).

Más allá de los factores físicos, químicos y nutricionales que determinan el curso de la fermentación, intervienen también procesos de deriva ecológica asociados al azar biológico. Estos procesos comprenden variaciones accidentales, eventos temporales y cambios estocásticos que no pueden predecirse por completo mediante modelos determinísticos, lo que evidencia que la dinámica microbiana no responde únicamente a condiciones estrictamente controlables, sino también a fluctuaciones locales y contingencias propias de los sistemas vivos.

Así, la supervivencia o desaparición de una determinada bacteria puede depender de pequeñas variaciones espaciales –diferencias de apenas 0,1 a 0,3 unidades de pH, gradientes de oxígeno del orden de 1-3 % entre microzonas o variaciones puntuales en la concentración de nutrientes– suficientes para modificar el destino de poblaciones enteras dentro del mismo recipiente. Cuando un microorganismo desaparece, libera nichos ecológicos que permiten la expansión de otros organismos previamente limitados, dando paso a sustituciones que pueden alterar profundamente la trayectoria metabólica del sistema y modificar la producción de ácidos orgánicos, ésteres aromáticos, alcoholes superiores y otros compuestos sensoriales clave. De este fenómeno

surgen combinaciones organolépticas sutiles e impredecibles que explican la singularidad de ciertos lotes fermentados –incluso entre cubas idénticas y bajo idénticas condiciones de proceso–, como ocurre, por ejemplo, en algunas producciones vinícolas de alto valor donde dos barricas elaboradas el mismo día pueden presentar diferencias aromáticas detectables sensorialmente (Groenenboom et al., 2022).

En consecuencia, dirigir una industria moderna de alimentos fermentados saludables y funcionales no depende únicamente de la incorporación de cepas comerciales seleccionadas. La inoculación de cultivos liofilizados, aunque ciertamente relevante, no garantiza por sí sola el éxito del proceso, pues la verdadera estabilidad del sistema se construye a partir de un conjunto mucho más amplio de factores. La producción de fermentados estables y seguros exige un control científico, meticuloso y continuo de las variables del sistema; entre ellas, la temperatura –que debe mantenerse generalmente dentro de rangos estrechos de $\pm 1-2$ °C según el producto–, la humedad relativa (habitualmente entre el 75 y el 95 % en cámaras de maduración), la composición química del sustrato, las condiciones abióticas del entorno y, sobre todo, la dinámica competitiva entre microorganismos. En este sentido, el objetivo no es solo introducir microorganismos deseables, sino conducir adecuadamente un ecosistema vivo, complejo y funcional, capaz de mantener su equilibrio a lo largo del tiempo. Solo mediante esta gestión integral, que combina conocimiento microbiológico, control de proceso y comprensión ecológica, resulta posible obtener un producto final estable, seguro y apto para el consumo humano.

Sucesión e Interacciones Microbianas

El Concepto de Sucesión Microbiana

Quienes se adentran por primera vez en el mundo de la fermentación pueden tener la impresión de que los microorganismos que transforman un alimento permanecen constantes a lo largo de todo el proceso. Sin embargo, la realidad

ecológica es mucho más dinámica y fascinante: la comunidad microbiana que habita un fermentador no es estática, sino que se transforma de manera continua y ordenada en el tiempo. A este fenómeno se le denomina sucesión microbiana, y comprenderlo resulta esencial para cualquier estudiante de biotecnología que desee dominar los fundamentos de los procesos fermentativos.

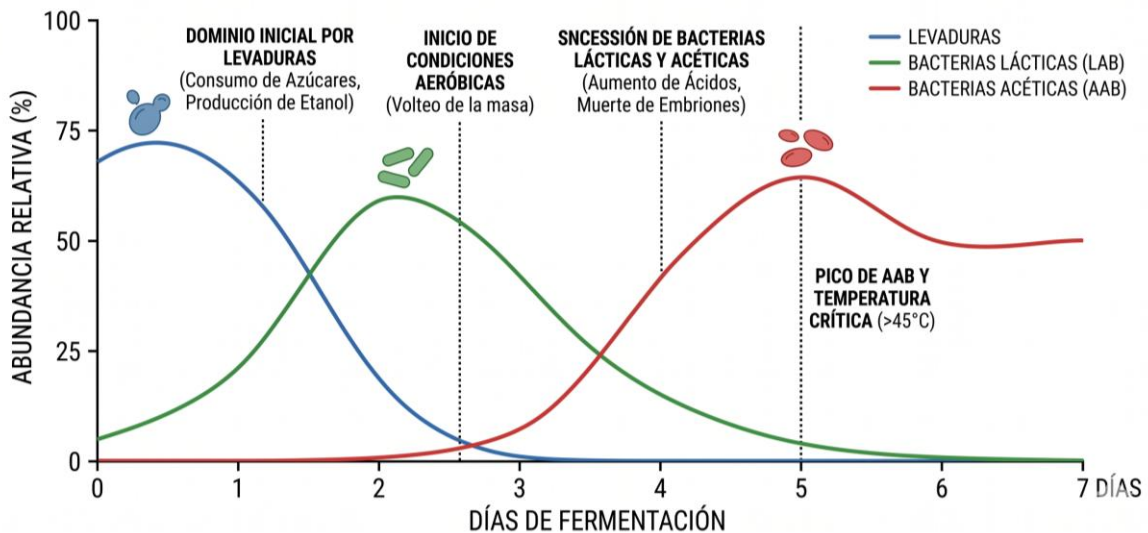
La sucesión microbiana es un proceso ecológico dinámico en el que la composición y abundancia de los microorganismos cambia a lo largo del tiempo dentro de una comunidad. Se trata de un concepto análogo a la sucesión ecológica clásica que ocurre entre plantas y animales en un bosque o una pradera –donde una especie pionera va cediendo espacio a otras más adaptadas al entorno maduro– pero que en el caso microbiano se desarrolla a escalas de tiempo incomparablemente más rápidas, a menudo en horas o días (Asiedu et al., 2026; Qian et al., 2025). Esta velocidad convierte a los sistemas fermentativos en auténticos laboratorios naturales donde es posible observar, en tiempo real, los principios fundamentales de la ecología microbiana.

A partir de la evidencia científica revisada, la sucesión microbiana en fermentaciones puede describirse como el proceso por el cual diferentes especies microbianas se vuelven dominantes de manera progresiva, a medida que cambian los recursos disponibles, el hábitat fisicoquímico y las condiciones ambientales del sistema (Carter, 2020; Wu et al., 2024). En el contexto de alimentos fermentados como el baijiu, el miso o la cerveza de tipo lambic, este proceso sigue patrones reconocibles: ciertos géneros dominan las etapas iniciales, mientras que otros más especializados emergen conforme el medio se transforma por la acción de los propios microorganismos (Wen et al., 2025; Zhang et al., 2026; Li et al., 2024).

DATO CURIOSO "Sucesión sin planificación" En una fermentación espontánea de vino, nadie "diseña" qué levaduras aparecen ni cuándo lo hacen. Sin embargo, la secuencia es casi siempre la misma: primero irrumpen levaduras no-*Saccharomyces* tolerantes al azúcar; luego *Saccharomyces cerevisiae* domina la etapa alcohólica principal. Este orden no es casualidad, sino el resultado de la selección ecológica que opera sobre millones de generaciones de evolución microbiana.

La sucesión ocurre por la convergencia de tres mecanismos fundamentales. En primer lugar, las condiciones ambientales cambian de forma dinámica: la temperatura varía, la humedad fluctúa, el pH desciende y los nutrientes simples se agotan progresivamente. En segundo lugar, los propios microorganismos modifican el entorno en el que viven, generando nuevas oportunidades –o nuevas restricciones– para otras especies. En tercer lugar, coexisten procesos determinísticos y estocásticos que determinan cuál especie logra establecerse en cada etapa: los primeros obedecen a la selección ambiental, mientras que los segundos responden al azar de la colonización, la deriva ecológica y la inmigración aleatoria (Wen et al., 2025; Zhang et al., 2026).

Ilustración 3.3 Diagrama de líneas temporales: sucesión microbiana en fermentación modelo (cacao)



Nota. La imagen muestra la sucesión microbiana durante el proceso de fermentación, evidenciando el predominio inicial de levaduras, seguido por bacterias lácticas y posteriormente bacterias acéticas. Estos cambios poblacionales están asociados con variaciones en las condiciones ambientales, la producción de metabolitos y el incremento de la temperatura durante la fermentación.

¿Por Qué Algunos Microorganismos Predominan en Etapas Tempranas y Otros en Etapas Tardías?

La comprensión de la sucesión microbiana no estaría completa sin responder a una pregunta que surge de manera natural: ¿por qué ciertos microorganismos son pioneros y otros son colonizadores tardíos? La respuesta radica en las diferencias fisiológicas y ecológicas que existen entre los distintos grupos, y en cómo cada uno de ellos está adaptado a condiciones específicas del ambiente.

Uno de los marcos explicativos más poderosos para entender este fenómeno es la dicotomía entre las estrategias ecológicas r y K. Los microbios r-estrategas, también llamados copiotróficos, son organismos de crecimiento rápido que se benefician de la abundancia de nutrientes simples y las condiciones variables características de las etapas iniciales. En las primeras horas de una fermentación, cuando los azúcares y los compuestos nitrogenados son abundantes y el pH aún es neutro o moderadamente ácido, grupos como las Proteobacteria o el género *Bacillus* logran reproducirse a velocidades extraordinarias, explotando los recursos antes de que cualquier otro competidor pueda establecerse (Zhang et al., 2026; Muhammad et al., 2026). Su ventaja es la velocidad; su debilidad, la dependencia de condiciones que no duran.

A medida que la fermentación avanza, el panorama cambia radicalmente. Los recursos fácilmente disponibles se agotan; el ambiente se vuelve más ácido, más rico en alcoholes o en ácidos orgánicos, y los sustratos remanentes son

estructuralmente complejos, como la lignina, los compuestos recalcitrantes o los polisacáridos de cadena larga. Este nuevo entorno no favorece a los colonizadores rápidos, sino a los K-estrategas u oligotróficos: organismos lentos, eficientes y altamente especializados, como las Actinobacteria o los hongos Basidiomycota, que prosperan donde los recursos son escasos pero su metabolismo altamente especializado les permite extraer energía de sustratos que otros microorganismos no pueden degradar (Tikhonova & Kravchenko, 2020; Skubała et al., 2025).

DATO CURIOSO "El papel del ácido láctico como 'guardián de la fermentación' "En fermentaciones de vegetales como el kimchi o el chucrut, las bacterias lácticas producen ácido láctico con tal rapidez que el pH puede descender de 6 a menos de 4 en tan solo 24 horas. Este descenso ácido actúa como un filtro biológico natural que elimina a los competidores no acidotolerantes y permite que las bacterias lácticas dominen las etapas más avanzadas del proceso.

Los cambios en los recursos disponibles también son un motor poderoso de la sucesión. En fermentaciones alimentarias, los primeros colonizadores aprovechan los azúcares simples y los aminoácidos libres; pero con el tiempo, los subproductos de su propio metabolismo –acidez, alcoholes, bacteriocinas– seleccionan de manera implacable a los microorganismos que puedan tolerarlos. Así, las bacterias lácticas acidotolerantes como *Lactobacillus* y *Lactiplantibacillus* emergen como dominantes en etapas intermedias y tardías de fermentaciones vegetales, lácteas y de cereales (Zeng et al., 2025; Geng et al., 2025). En ecosistemas naturales como suelos y ambientes acuáticos, el proceso es paralelo: la disminución del carbono lábil y el aumento del carbono recalcitrante desplaza progresivamente el protagonismo hacia hongos saprótrofos y bacterias altamente especializadas (Sun et al., 2025; Muhammad et al., 2026).

La complejidad de las interacciones bióticas también contribuye a moldear la sucesión. En las etapas iniciales, las interacciones entre microorganismos son simples y las redes ecológicas poco moduladas. Con el paso del tiempo, la competencia se intensifica, la exclusión competitiva expulsa a los grupos menos adaptados y las etapas avanzadas exhiben redes de interacción más complejas, más estables y con mayor especialización funcional (He et al., 2024; Yu et al., 2025). Finalmente, el papel de los procesos estocásticos –el azar– es mayor en las etapas iniciales, cuando la selección ambiental todavía es débil y la colonización aleatoria puede determinar quién se establece primero. En las etapas finales, en cambio, los determinismos ecológicos –el filtrado ambiental y la competencia– imponen su lógica con fuerza creciente (He et al., 2024; Yu et al., 2025; Ma et al., 2026).

Tipos de Interacciones entre Microorganismos Fermentativos

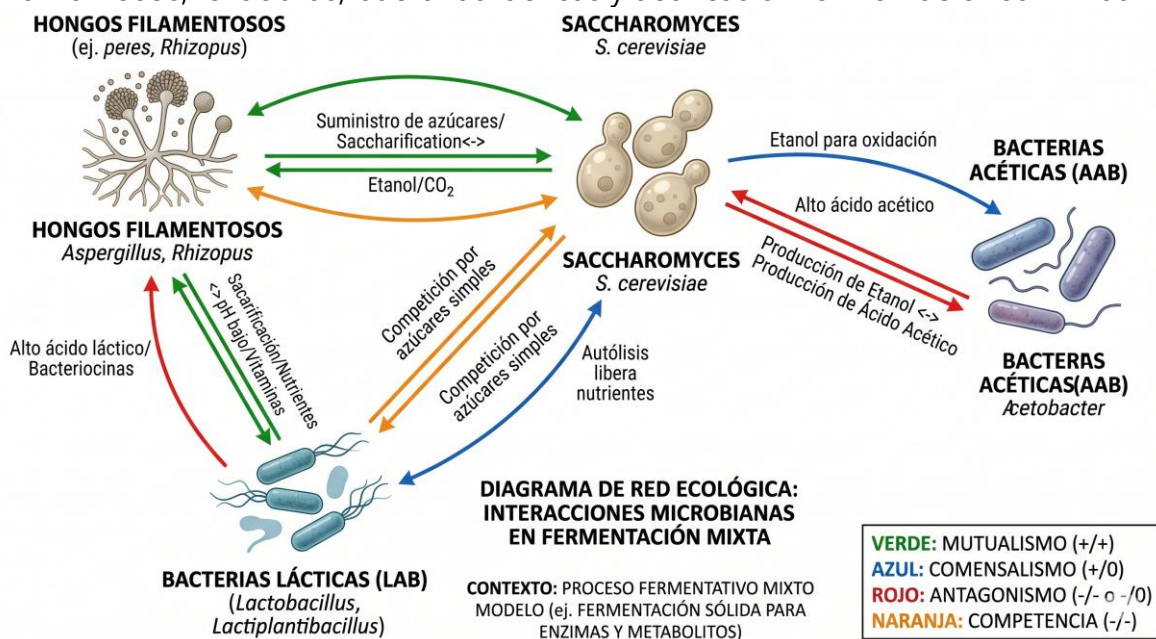
Comprender la sucesión microbiana requiere también conocer el tejido de relaciones que une a los protagonistas del proceso: las interacciones entre microorganismos. Lejos de operar como entidades aisladas, las especies fermentativas forman redes ecológicas donde la cooperación, la competencia y el antagonismo se entrelazan de maneras que determinan, en última instancia, la calidad y las características del producto final.

A partir del amplio conjunto de evidencias disponibles, las interacciones entre microorganismos fermentativos pueden agruparse en seis grandes categorías ecológicas: mutualismo, comensalismo, cooperación metabólica o sintrófica, competencia, amensalismo o antagonismo, y parasitismo o predación. Todas ellas aparecen repetidamente en fermentaciones alimentarias, bebidas alcohólicas y sistemas anaerobios (Zong et al., 2026; Guo et al., 2025).

El mutualismo, en el que ambas especies se benefician de la interacción, es quizás la forma más frecuente en fermentaciones mixtas. Un ejemplo clásico y bien

documentado es el que existe entre *Saccharomyces cerevisiae* y las bacterias ácido-lácticas (LAB): la levadura libera aminoácidos y metabolitos nitrogenados en un proceso de desbordamiento metabólico –nitrogen overflow– que estimula activamente el crecimiento de *Lactobacillus plantarum* y *Lactococcus lactis* (Ponomarova et al., 2017). De manera similar, en la producción de queso y yogur, *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus bulgaricus* mantienen una relación de apoyo mutuo basada en el intercambio de aminoácidos, carbono y vitaminas –fenómeno conocido como cross-feeding– que acelera la fermentación y enriquece el perfil sensorial del producto (Zareie et al., 2025). En fermentaciones de café, cacao y otros alimentos de alta complejidad aromática, las levaduras crean condiciones óptimas de pH y nutrientes que facilitan el establecimiento y el funcionamiento de las LAB, las cuales a su vez producen compuestos aromáticos que enriquecen la experiencia sensorial del producto final (Lu et al., 2026).

Ilustración 3.4 Red de interacciones ecológicas y flujos metabólicos entre hongos filamentosos, levaduras, bacterias lácticas y acéticas en fermentaciones mixtas.



Nota. La imagen presenta una red ecológica de interacciones microbianas en fermentaciones mixtas, donde hongos filamentosos, levaduras y bacterias lácticas y acéticas establecen relaciones de mutualismo, competencia, comensalismo y

antagonismo. Estas interacciones regulan la disponibilidad de nutrientes, la producción de metabolitos y la estabilidad del proceso fermentativo.

El comensalismo –donde una especie se beneficia sin afectar a la otra– también está bien representado en los ecosistemas fermentativos. En el vino de palma, por ejemplo, las bacterias acéticas convierten el etanol producido por las levaduras en ácido acético, obteniendo su sustrato sin alterar el crecimiento de la levadura (Sumerta et al., 2025). Algunas bacterias auxotróficas, que son incapaces de sintetizar ciertos nutrientes esenciales, sobreviven gracias a los metabolitos liberados por hongos o levaduras sin que estas últimas reciban ningún beneficio o perjuicio (Lin et al., 2022).

La cooperación metabólica o sintrófica –que incluye el cross-feeding y la transferencia interespecífica de electrones– resulta clave para la estabilidad, la formación de compuestos de sabor y la degradación completa de sustratos en sistemas complejos. En biofilms electrogénicos y digestores anaerobios, los microorganismos fermentadores producen compuestos reducidos como hidrógeno y ácidos grasos volátiles, que son utilizados directamente por microorganismos electrogénicos o metanogénicos, estableciendo una cooperación sintrófica esencial para el funcionamiento del sistema (Liang et al., 2026; Su et al., 2026; Pillot et al., 2020). Se ha demostrado incluso que materiales conductores como el carbón activado pueden facilitar la Transferencia Directa de Electrones entre Especies –DIET, por sus siglas en inglés–, intensificando la cooperación en digestores anaerobios (Liang et al., 2026).

La competencia por nutrientes y nichos ecológicos está igualmente documentada. En fermentaciones de vino, la competencia por el nitrógeno entre levaduras no-*Saccharomyces* y *S. cerevisiae* puede alterar la cinética fermentativa y provocar fermentaciones lentas o estancadas (Medina et al., 2012). En el tabaco fermentado y en el baijiu, géneros dominantes como *Staphylococcus* y *Bacillus*

establecen relaciones negativas con otros géneros por la combinación de competencia directa y modificación ambiental (Liu et al., 2026).

Las interacciones antagonistas –en las que una especie inhibe o perjudica a otra– son también ubicuas. Las LAB producen ácido láctico y diversas bacteriocinas que inhiben el crecimiento de microorganismos sensibles, actuando como un sistema de biocontrol natural (Garcia & Remize, 2022). La levadura *S. cerevisiae*, por su parte, sintetiza etanol, dióxido de azufre y ácidos grasos de cadena media que inhiben bacterias del vino como *Oenococcus oeni* (Alexandre et al., 2004; Balmaseda et al., 2018). Los mecanismos de antagonismo pueden ser incluso más sofisticados: la levadura *Metschnikowia pulcherrima* secreta un compuesto llamado pulcherrimina que secuestra el hierro del medio, bloqueando eficazmente el crecimiento de levaduras competidoras (Oro et al., 2014). Se han identificado además péptidos antimicrobianos derivados de la enzima GAPDH en *S. cerevisiae*, activos tanto contra bacterias como contra otras levaduras (Branco et al., 2014).

Finalmente, el parasitismo y la predación también tienen su lugar en los ecosistemas fermentativos. Los bacteriófagos, por ejemplo, pueden afectar de manera profunda la dinámica de las LAB en fermentaciones como el kimchi, modulando la velocidad y la dirección del proceso (Jung et al., 2022). Las relaciones de predación por ciliados sobre bacterias se han descrito en fermentaciones tradicionales, añadiendo una capa adicional de complejidad ecológica al sistema (Wu et al., 2023).

En conjunto, las fermentaciones no son simples reacciones bioquímicas conducidas por un único microorganismo, sino ecosistemas dinámicos donde redes complejas de interacciones positivas y negativas determinan la sucesión microbiana, la estabilidad del proceso y la formación de los compuestos responsables del sabor, la textura y los beneficios funcionales del alimento final.

Cómo las Interacciones Microbianas Determinan el Resultado Final de la Fermentación

Interacciones Positivas: Cooperación que Enriquece el Producto

Comprender las interacciones microbianas no es simplemente un ejercicio de taxonomía ecológica; es entender por qué un producto fermentado tiene las características que lo hacen único, seguro y delicioso. La evidencia científica acumulada es inequívoca: las interacciones entre microorganismos modulan de forma decisiva la calidad sensorial, la seguridad, la estabilidad y la eficiencia del proceso fermentativo (Guo et al., 2025; Chen et al., 2025).

Entre las interacciones que producen efectos más favorables se encuentran las de tipo cooperativo, que incluyen el cross-feeding metabólico y la relación sintrófica. Estas facilitan la síntesis de compuestos aromáticos clave –como los ésteres frutales en bebidas fermentadas– y representan la base del perfil sensorial que define la identidad de numerosos alimentos tradicionales (Zong et al., 2026). En la kombucha, por ejemplo, la coexistencia dinámica de bacterias acéticas, levaduras y bacterias lácticas potencia la formación de aromas florales y frutales que ninguno de estos grupos podría generar de manera aislada (Liao et al., 2025). En cofermentaciones de bacterias lácticas con levaduras, el trabajo conjunto acelera la fermentación, incrementa la concentración de ácidos orgánicos y genera perfiles aromáticos significativamente más complejos que los obtenidos con cultivos puros (Liang et al., 2025; Zhao et al., 2025).

DATO CURIOSO “El queso como ecosistema” En la producción de queso de pasta blanda, la relación simbiótica entre *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus bulgaricus* ha sido perfeccionada durante miles de años de práctica artesanal. *S. thermophilus* consume el oxígeno disponible, creando condiciones anóxicas que favorecen al bacilo; este, a su vez, libera aminoácidos que el estreptococo necesita para crecer. El resultado es una fermentación más rápida, una acidificación más uniforme y un perfil de sabor más complejo que el que cualquiera de las dos bacterias produciría por sí sola.

El mutualismo entre microorganismos también es responsable de fenómenos de facilitación ecológica que tienen impacto directo en la seguridad del alimento. En vinificación, la presencia coordinada de *Oenococcus oeni* junto a *Saccharomyces cerevisiae* no solo genera mayor complejidad aromática al desacidar el vino mediante la fermentación maloláctica, sino que también reduce ciertos compuestos indeseados, como el ácido málico, mejorando el equilibrio gustativo del producto final (Sun et al., 2026).

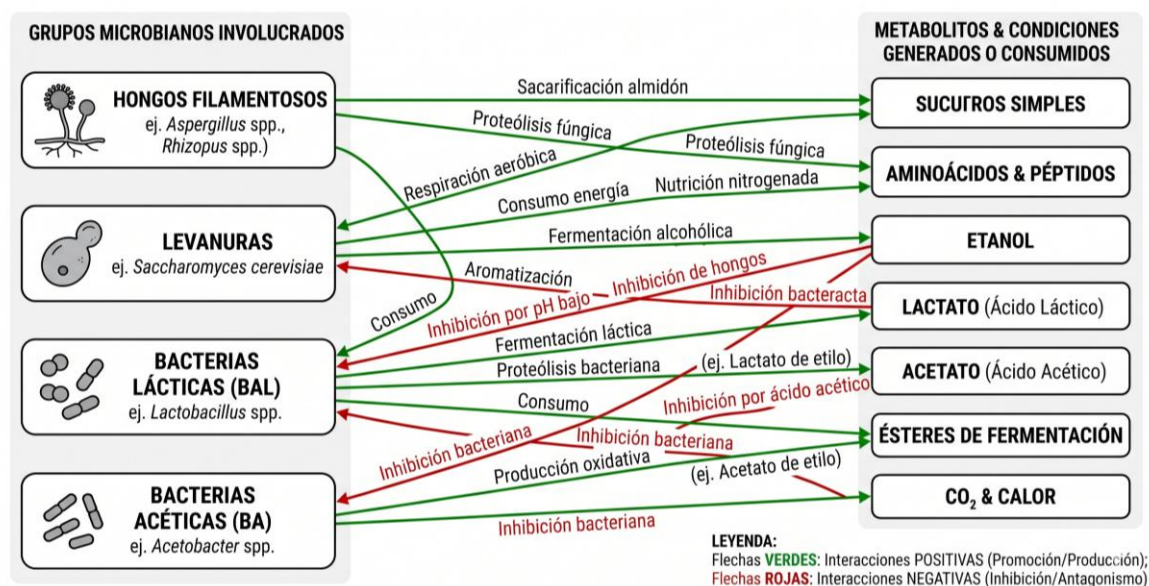
En los sistemas fermentativos anaerobios más complejos, como los digestores de biogás, la pérdida de interacciones sintróficas tiene consecuencias dramáticas: la generación de metano cae drásticamente cuando se interrumpe la cooperación entre los fermentadores primarios y las arqueas metanogénicas (Lv et al., 2022). Esto ilustra con claridad que la eficiencia de la fermentación, entendida como sistema, no puede reducirse a la suma de las capacidades individuales de sus participantes.

Interacciones Negativas: Control Microbiano y Modulación del Perfil Aromático

Las interacciones de tipo negativo –competencia y antagonismo– desempeñan un papel igualmente relevante, aunque a menudo subestimado. Lejos de ser simplemente destructivas, estas interacciones actúan como mecanismos de regulación que depuran la comunidad microbiana, eliminan competidores indeseados y orientan el metabolismo hacia rutas específicas de interés tecnológico.

La competencia por nutrientes y nichos ecológicos puede modificar la disponibilidad de fuentes de carbono y nitrógeno, redirigiendo rutas metabólicas y alterando el perfil de compuestos volátiles del producto final. En fermentaciones de baijiu, la disputa por recursos entre diferentes comunidades puede disminuir la producción de ciertos alcoholes e incrementar la de ésteres, mejorando la calidad aromática del destilado (Zhang et al., 2025). En sistemas de cofermentación de bacterias lácticas y levaduras, la competencia controlada puede equilibrar el metabolismo y evitar la acumulación de compuestos indeseables, como el diacetilo o el acetaldehído en exceso (Sun et al., 2026).

Ilustración 3.5 Diagrama de flujo bipartito: interacciones microbianas y metabólicas en una fermentación mixta modelo



Nota. La imagen resume las interacciones entre grupos microbianos involucrados en fermentaciones mixtas y los metabolitos generados durante el proceso. Asimismo, se destacan las relaciones positivas y negativas entre hongos filamentosos, levaduras y bacterias, las cuales influyen en la producción de compuestos como etanol, lactato, acetato, ésteres y dióxido de carbono.

Las relaciones antagonistas –en las que una especie produce compuestos que inhiben el crecimiento de otras– son particularmente importantes desde la perspectiva de la seguridad alimentaria. Las bacterias lácticas pueden reducir la concentración de nitritos y aminas biogénicas en fermentaciones vegetales, mejorando la inocuidad del producto (Liao et al., 2024). En sistemas de vinagre y vino, las interacciones antagonistas entre bacterias acéticas y bacterias lácticas regulan cuál de los dos grupos domina en cada etapa, condicionando la intensidad aromática y la consistencia del producto lote a lote (Li et al., 2025; de Gioia et al., 2022).

La Organización Comunitaria: Biofilms y Redes Microbianas

Las interacciones microbianas no se producen únicamente entre células flotando libremente en el medio líquido. Con frecuencia, los microorganismos se organizan en estructuras tridimensionales adheridas a superficies –los biofilms– en las que la proximidad física intensifica los intercambios metabólicos y los efectos de cada tipo de interacción.

En biofilms mixtos de bacterias lácticas y levaduras, la cooperación se ve potenciada: la formación de un biofilm de doble capa incrementa la eficiencia respiratoria, la producción aromática y el rendimiento metabólico global (Kang et al., 2024). En el kéfir, la formación de biofilm regulada por señales de quórum sensing –comunicación química entre microorganismos que les permite coordinar su comportamiento en función de la densidad poblacional– mejora la viscosidad, la retención de agua y la riqueza del perfil aromático del producto final (Zhou et al., 2026).

DATO CURIOSO “El quórum sensing en la fermentación artesanal” El quórum sensing es el mecanismo mediante el cual las bacterias "sienten" cuántas de sus congéneres están presentes en el entorno y ajustan su comportamiento –incluyendo la producción de enzimas, toxinas o biofilm– en consecuencia. En el kéfir tradicional, este sistema de comunicación química coordina la formación del grano de kéfir, esa característica masa gelatinosa que alberga la comunidad microbiana. Sin esta coordinación, el grano no se formaría y la fermentación perdería su complejidad sensorial característica.

Las comunidades microbianas con alta conectividad entre sus miembros –es decir, donde se establecen más interacciones positivas– producen fermentaciones más estables, con sabores más consistentes y rendimientos más predecibles (Liao et al., 2024; Gao et al., 2022). En sistemas más complejos como la digestión anaerobia industrial, se ha demostrado que una mayor conectividad en la red microbiana favorece directamente un mejor rendimiento en la producción de metano (Wu et al., 2020).

Las Interacciones como Determinante Central del Sabor y el Aroma

La consecuencia más tangible de todas estas interacciones –mutualismos, cooperaciones, competencias, antagonismos– se manifiesta en el plato y en el vaso: las propiedades sensoriales del alimento fermentado. La evidencia científica más reciente confirma que las interacciones microbianas son el principal determinante del perfil de compuestos volátiles, por encima de las capacidades individuales de cada especie (Chen et al., 2025; Guo et al., 2025).

Los cambios en la sucesión microbiana inducidos por estas interacciones alteran la producción de alcoholes, ésteres, aldehídos y compuestos umami, dando lugar a la enorme diversidad sensorial que caracteriza a los productos fermentados de todo el mundo (Liu et al., 2026; Qin et al., 2024). Las interacciones también actúan sobre las vías metabólicas centrales: el metabolismo de carbohidratos,

aminoácidos, lípidos y compuestos nitrogenados se ve modulado de manera coordinada por la acción simultánea de múltiples actores microbianos (Zhang et al., 2025; Yu et al., 2024).

En definitiva, la fermentación no es un proceso que depende de un único microorganismo trabajando en solitario. Es el resultado emergente de una red ecológica dinámica donde cooperación, competencia y antagonismo se equilibran para dar lugar a algo que ningún participante individual podría producir por sí solo: la complejidad sensorial, la seguridad microbiológica y la identidad cultural de un alimento fermentado.

Fermentaciones Espontáneas y Dirigidas

La Fermentación Espontánea: Naturaleza, Imprevisibilidad y Riqueza

En el vasto universo de las fermentaciones, existe una categoría que puede considerarse la más antigua y, en cierta medida, la más fascinante desde el punto de vista ecológico: la fermentación espontánea. A diferencia de las fermentaciones modernas, que dependen de inóculos controlados y condiciones estandarizadas, la fermentación espontánea se produce cuando los microorganismos autóctonos –presentes en el sustrato, el equipo de procesamiento, el ambiente o el espacio de producción– desencadenan el proceso sin ninguna intervención intencional del ser humano (Piraine & Bochman, 2025; Spitaels et al., 2014).

Lo que convierte a la fermentación espontánea en un objeto de estudio tan intrigante es precisamente su naturaleza impredecible y polimórfica. No existe una composición microbiana fija ni una trayectoria metabólica única: cada lote, cada cosecha, cada temporada del año puede dar lugar a una comunidad microbiana diferente y, por ende, a un producto con características propias (Ding et al., 2026; Li et al., 2022). Esta variabilidad, que desde el punto de vista industrial puede percibirse como un inconveniente, es precisamente la que confiere a muchos productos artesanales su carácter irrepetible y su identidad de origen –

el llamado *terroir* microbiano, concepto extrapolado desde la viticultura a casi cualquier sistema fermentativo ligado a un territorio (Bokulich et al., 2014; Bokulich et al., 2016).

DATO CURIOSO “*La lambic: la cerveza que respira el aire de Bruselas*” La cerveza lambic, producida en la región del Pajottenland, en Bélgica, es quizás el ejemplo más emblemático de fermentación espontánea en la industria cervecera. El mosto se expone deliberadamente al aire abierto en reposos nocturnos, dejando que los microorganismos presentes en el ambiente colonial invadan y fermenten el líquido durante uno a tres años. El resultado es una cerveza de acidez compleja, con notas frutales y terrosas, imposible de reproducir fuera de su entorno geográfico de origen.

La sucesión microbiana en fermentaciones espontáneas sigue, no obstante, un patrón general reconocible. En las etapas iniciales, cuando el pH es neutro y los nutrientes son abundantes, colonizan el sustrato organismos no especializados, con frecuencia potencialmente dañinos para la calidad del producto. A medida que avanza el proceso, los ácidos orgánicos producidos por las bacterias lácticas y las levaduras acid-tolerantes van seleccionando progresivamente a los microorganismos más aptos para el ambiente ácido, etanólico y nutricionalmente empobrecido de las etapas tardías (Aldrete-Tapia et al., 2020; Kang et al., 2024). El resultado final de esta selección natural es la característica complejidad sensorial de los productos fermentados espontáneamente.

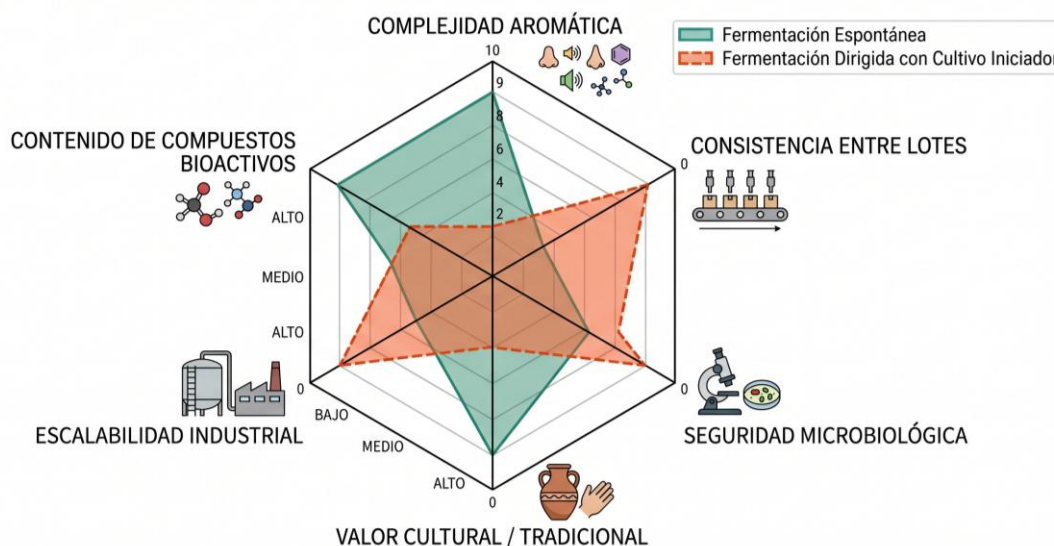
Ventajas y Desventajas de la Fermentación Espontánea

Los productos obtenidos mediante fermentación espontánea presentan una serie de propiedades que los distinguen favorablemente de sus equivalentes industriales. En primer lugar, su complejidad sensorial suele ser mayor: hidromiel, vinos y cafés de origen fermentados espontáneamente generan perfiles aromáticos con mayor diversidad y riqueza que los producidos con cultivos iniciadores únicos. En segundo lugar, la diversidad microbiana favorece el

enriquecimiento de compuestos funcionales: polifenoles, flavonoides, antioxidantes, péptidos bioactivos, GABA y vitamina B₂ se acumulan con mayor abundancia en productos de fermentación espontánea (Fitsum et al., 2025; Chin-Feng et al., 2026; Li et al., 2023). Finalmente, estos procesos tienen un menor impacto ambiental al no requerir aditivos ni inoculantes industriales, y preservan las prácticas tradicionales y las microbiotas locales que forman parte del patrimonio cultural de las comunidades (Capozzi et al., 2017).

Ilustración 3.6 Gráfica comparativa radar: enfoques de fermentación en alimentos y bebidas

Comparación de Variables Clave en Fermentación Espontánea vs. Dirigida con Cultivo Iniciador



Nota. La imagen compara variables clave entre la fermentación espontánea y la fermentación dirigida con cultivo iniciador. Se observa que la fermentación espontánea presenta mayor complejidad aromática, contenido de compuestos bioactivos y valor tradicional, mientras que la fermentación dirigida ofrece mayor consistencia entre lotes, seguridad microbiológica y escalabilidad industrial.

Sin embargo, la fermentación espontánea también conlleva riesgos y limitaciones que no pueden ignorarse. El más crítico es la seguridad alimentaria: la ausencia de control sobre el microbiota inicial puede permitir que patógenos como *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp. o *Escherichia coli* se establezcan en las etapas

tempranas, especialmente si la acidificación no se produce con suficiente rapidez. Además, ciertas bacterias pueden producir aminas biogénicas como histamina y tiramina que representan riesgos para la salud de individuos sensibles (Capozzi et al., 2017). En productos como el cacao fermentado, la aparición de micotoxinas en etapas tardías del proceso añade una capa adicional de preocupación sanitaria (Constante Catuto et al., 2024).

La variabilidad es también una desventaja significativa. Los lotes de fermentación espontánea son intrínsecamente inconsistentes: el perfil sensorial puede variar dramáticamente entre producciones del mismo productor, lo que dificulta la estandarización comercial y la fidelización de los consumidores (Piraine et al., 2021; Liang et al., 2023). Los procesos pueden ser lentos o incluso detenerse si el microbiota autóctono no tiene la composición adecuada, y la presencia de compuestos indeseados –exceso de acidez, olores sulfurosos, colores anómalos– es un riesgo latente (Lu et al., 2022; Campus et al., 2015). Esta baja escalabilidad industrial limita su aplicación a producciones de pequeña escala donde la artesanidad y el valor cultural justifican la inversión de tiempo y el aceptable riesgo de variabilidad.

La Fermentación Dirigida: Control, Reproducibilidad y Precisión

Frente a la naturaleza impredecible de la fermentación espontánea, la biotecnología moderna ha desarrollado un enfoque radicalmente diferente: la fermentación dirigida. En este tipo de proceso, el ser humano interviene de manera deliberada y sistemática sobre los microorganismos y las condiciones de fermentación, con el objetivo de obtener un producto final con características específicas, predecibles y reproducibles. La fermentación dirigida no deja al azar la determinación de quién fermenta ni cómo lo hace; en su lugar, selecciona cuidadosamente las cepas, estandariza los parámetros fisicoquímicos y monitorea en tiempo real el estado del proceso.

En su definición más fundamental, la fermentación dirigida implica la modificación racional –y en algunos casos genética– de los microorganismos para lograr mejoras funcionales predeterminadas (Hua et al., 2026). En la práctica industrial, esto se traduce en el uso de cepas únicas o mixtas cuidadosamente seleccionadas en lugar del microbiota natural del entorno, con el propósito de mejorar la producción de metabolitos de interés, optimizar los perfiles de sabor y aroma, o garantizar la seguridad del producto (Zhang et al., 2021). El control estricto de parámetros como temperatura, pH, oxígeno disuelto, concentración de nutrientes y tiempo de proceso actúa como el motor que dirige el metabolismo microbiano hacia el resultado deseado (Guo et al., 2025; Tan et al., 2025).

DATO CURIOSO *"La fermentación de precisión: microorganismos como fábricas moleculares"* Una de las aplicaciones más emocionantes de la fermentación dirigida moderna es la producción de proteínas animales –como la albúmina sérica de vaca o la ovoalbúmina del huevo– mediante levaduras y hongos modificados genéticamente. Esta tecnología, conocida como "fermentación de precisión", permite fabricar ingredientes proteicos idénticos a los de origen animal sin necesidad de vacas ni gallinas, con un impacto ambiental radicalmente inferior.

Las aplicaciones prácticas de la fermentación dirigida son extraordinariamente diversas. En la industria cervecera, el uso de cepas específicas de *Saccharomyces cerevisiae* permite incrementar la producción de ésteres aromáticos como el acetato de etilo y el acetato de isoamilo, responsables de los característicos aromas frutales de ciertos estilos de cerveza artesanal (Zhang et al., 2021). En la producción de café y cacao de especialidad, el control preciso de la temperatura y el pH durante la fermentación reduce la variabilidad entre lotes y permite generar perfiles sensoriales más complejos y consistentes (Pholtaisong et al., 2025; Peñuela-Martínez et al., 2023). En el campo de los biopolímeros funcionales, el ajuste cuidadoso de nutrientes, oxígeno y pH durante la

fermentación sumergida de *Ganoderma lucidum* permite producir polisacáridos de alto peso molecular con estructuras específicas que confieren potentes propiedades inmunomoduladoras.

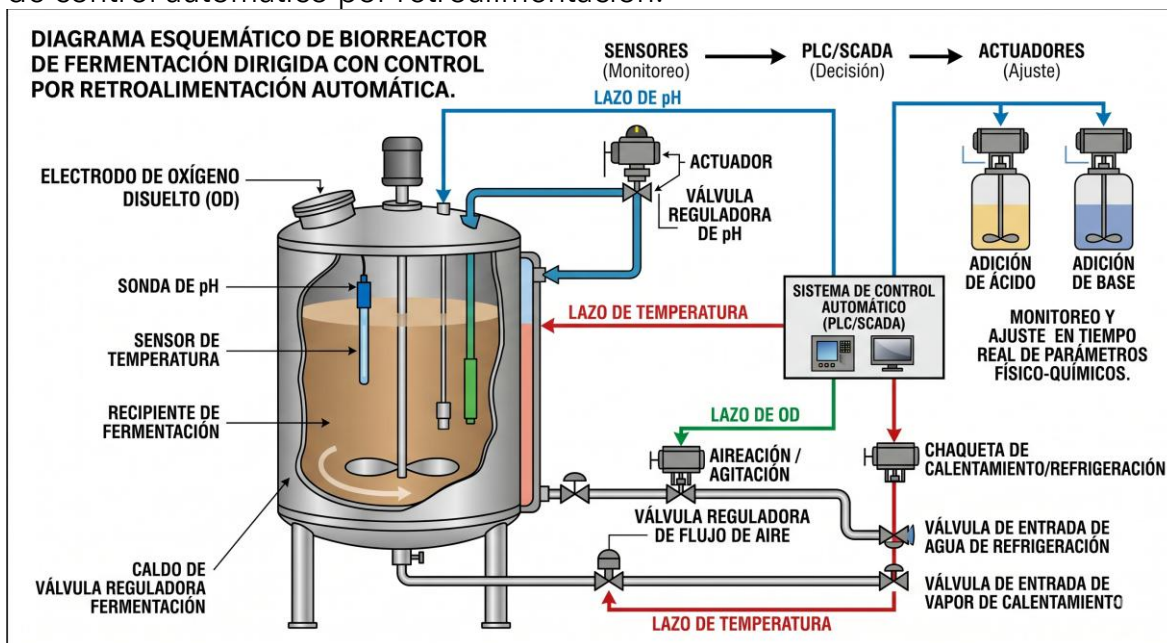
Control Microbiano en Fermentaciones Dirigidas: Herramientas y Estrategias

Lograr el control efectivo de una fermentación dirigida es un desafío de ingeniería biológica que requiere la integración de múltiples estrategias complementarias. La evidencia científica disponible permite identificar cinco pilares fundamentales sobre los que descansa el control microbiano en estos sistemas modernos.

El primero y más intuitivo es el uso de cultivos iniciadores –o *starter cultures*. La inoculación deliberada de cepas definidas y bien caracterizadas permite dirigir las rutas metabólicas desde el inicio, evitando que el microbiota ambiental tome el control del proceso. En la fermentación de café, el uso de cultivos iniciadores seleccionados reduce significativamente la variabilidad entre lotes, minimiza el riesgo de contaminaciones y genera perfiles sensoriales más consistentes y predecibles (Xu et al., 2026). En el ensilaje, las bacterias lácticas inoculadas actúan como moduladores biológicos que excluyen competitivamente a los microorganismos indeseados, incluyendo los productores de genes de resistencia a antibióticos (Qing et al., 2026).

El segundo pilar es el control ambiental preciso dentro del biorreactor. La temperatura, el pH y el oxígeno disuelto son los parámetros más críticos, y todos ellos se regulan mediante controladores automáticos y sensores en línea que permiten ajustes dinámicos en tiempo real. Los métodos de control van desde los clásicos controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) hasta estrategias avanzadas como el control en cascada, el control adaptativo, el DO-stat y los modelos predictivos basados en cinética microbiana (Lisci et al., 2021; Konstantinov et al., 1990).

Ilustración 3.7 Diagrama esquemático de un biorreactor industrial con sistemas de control automático por retroalimentación.



Nota. La imagen muestra un biorreactor de fermentación dirigida con control automatizado por retroalimentación, en el cual sensores de pH, temperatura y oxígeno disuelto permiten monitorear y ajustar en tiempo real las condiciones fisicoquímicas del proceso mediante sistemas PLC/SCADA y actuadores automáticos.

El tercer pilar es el monitoreo continuo mediante sensores y tecnologías analíticas avanzadas. Los biosensores y quimiosensores miniaturizados permiten seguir en tiempo real la concentración de biomasa, pH, temperatura y gases como CO₂ y O₂ (Alamprese & Grassi, 2025). Las técnicas espectroscópicas no invasivas –NIR, MIR, Raman y vis-NIR– permiten el seguimiento continuo de la cinética del proceso, el consumo de sustratos y la acumulación de metabolitos sin necesidad de tomar muestras (Dzurendova et al., 2023). La espectrometría de masas acoplada in situ permite detectar señales tempranas de desviaciones microbianas en fermentaciones continuas (Tarkiainen et al., 2005).

La integración de herramientas ómic –metagenómica, metabolómica y transcriptómica– con algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático constituye el cuarto pilar, y quizás el más revolucionario de todos. Estos sistemas pueden predecir la sucesión microbiana, detectar anomalías en el proceso y optimizar las condiciones de manera adaptativa, llevando la fermentación dirigida a un nivel de control sin precedentes (Gong et al., 2026; Xu et al., 2026).

El quinto pilar es el control del entorno de producción: la higiene y el saneamiento específico de superficies, la gestión del "terroir microbiano" de la instalación y el diseño del espacio de producción para reducir fuentes externas de contaminación o, en ciertos casos, para aprovechar de manera controlada el microbiota beneficioso del entorno (Chang et al., 2026; Lekocaj et al., 2025).

En las formas más avanzadas de fermentación dirigida –a menudo denominadas de *precisión*– el control alcanza también el nivel molecular, mediante la modificación genética y metabólica de los microorganismos para expresar rutas metabólicas deseadas con alta predictibilidad y baja sensibilidad a las fluctuaciones del proceso (Hua et al., 2026; Dalbanjan et al., 2024). La ingeniería metabólica de las cepas de producción –mejorando su tolerancia al estrés, su eficiencia metabólica y su productividad– es hoy el campo más dinámico de la biotecnología aplicada a la fermentación.



Factores que afectan la fermentación

Parte IV



Factores Físicos

La Temperatura como Regulador Central de la Fermentación

Entre todos los factores fisicoquímicos que determinan la dinámica de un proceso fermentativo, la temperatura ocupa, sin duda, un lugar privilegiado. Su influencia es omnipresente: afecta la velocidad de las reacciones enzimáticas, el crecimiento microbiano, la composición de la comunidad fermentativa y, en última instancia, el tipo y la cantidad de productos generados. Comprender la relación entre temperatura y fermentación es, por lo tanto, una competencia fundamental para cualquier biotecnólogo.

La lógica básica de la relación temperatura-fermentación sigue una curva característica con forma de campana: la actividad microbiana y la velocidad de fermentación aumentan progresivamente desde la temperatura mínima de crecimiento hasta alcanzar un pico en la temperatura óptima, específica para cada microorganismo, para luego caer bruscamente cuando se supera ese máximo y la célula entra en territorio de inactivación térmica (Yin et al., 2023; Biazzi et al., 2020). Matemáticamente, este comportamiento puede modelarse mediante ecuaciones tipo Arrhenius en el rango subóptimo, mientras que el rango completo de crecimiento se describe con mayor precisión mediante el modelo de Ratkowsky (Dobrić & Bååth, 2018).

DATO CURIOSO "*Saccharomyces uvarum*: la levadura del frío" Mientras que *Saccharomyces cerevisiae* domina la mayoría de las fermentaciones alcohólicas entre 25 y 35 °C, su congénere *Saccharomyces uvarum* tiene su óptimo de crecimiento en torno a los 12-15 °C. Por esta razón, *S. uvarum* domina las fermentaciones de vino en regiones de clima frío, aportando perfiles aromáticos ricos en ésteres frutales que son difíciles de obtener con *S. cerevisiae* a bajas temperaturas.

En el rango de temperaturas bajas –aproximadamente 10 a 15 °C– la fermentación avanza de manera perceptiblemente lenta. Las membranas celulares pueden tornarse excesivamente rígidas, el metabolismo se ralentiza y la actividad enzimática disminuye. Un ejemplo concreto de este efecto se observa en la fermentación de kombucha a 17 °C, donde la población microbiana crece con mucha más dificultad que a temperaturas cercanas al óptimo, y la acidificación del medio tarda significativamente más tiempo (Sadok et al., 2025). Este principio es ampliamente aprovechado en la producción de alimentos fermentados que requieren procesos lentos para desarrollar complejidad aromática, como ciertos vinos, cervezas de fermentación baja o quesos de lenta maduración.

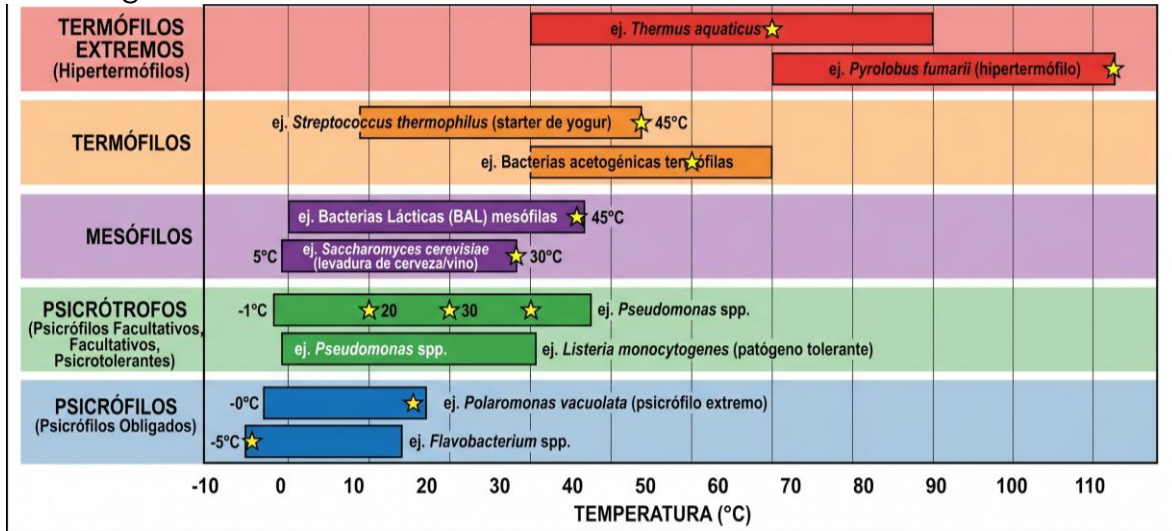
En el extremo opuesto, temperaturas superiores al óptimo de crecimiento producen daños progresivos en la célula microbiana: las enzimas se desnaturalizan, las proteínas transportadoras de membrana pierden funcionalidad y las reacciones de síntesis se desacoplan, reduciendo primero la velocidad de fermentación y finalmente causando la muerte celular (Bin Zakaria et al., 2022; Yang et al., 2025). Por esto, el control de la temperatura en biorreactores industriales no es simplemente una cuestión de comodidad operativa, sino un requisito crítico para garantizar la viabilidad del cultivo y la consistencia del producto.

Grupos Térmicos Microbianos y Su Relevancia en Fermentaciones

La enorme diversidad de microorganismos que participan en procesos fermentativos implica una igualmente amplia diversidad de rangos óptimos de temperatura. Los microorganismos mesófilos –con óptimos entre 30 y 40 °C– son los protagonistas de la gran mayoría de las fermentaciones alimentarias: las bacterias lácticas, las levaduras de panadería y cervecería, y muchos hongos filamentosos de interés industrial pertenecen a este grupo (Singh & Satyanarayana, 2017; Bhunia, 2014). Los termófilos, con óptimos entre 45 y 65 °C,

aparecen en procesos de compostaje, en fermentaciones a alta temperatura como el Daqu de baijiu y en digestión anaerobia termofílica (Wu et al., 2023). Los psicrófilos y psicrótrofos, capaces de crecer a temperaturas próximas a 0 °C, son relevantes en la maduración en frío de embutidos, quesos y productos cárnicos curados.

Ilustración 4.1 Gráfica de rangos de temperatura de crecimiento: microorganismos fermentativos



Nota. La imagen clasifica distintos microorganismos según su rango óptimo de crecimiento térmico, incluyendo psicrófilos, psicrótrofos, mesófilos, termófilos e hipertermófilos. Asimismo, se presentan ejemplos representativos utilizados en procesos biotecnológicos y fermentativos, destacando la influencia de la temperatura sobre la actividad y adaptación microbiana.

Un aspecto particularmente relevante en sistemas fermentativos complejos es el efecto de la temperatura sobre la composición de la comunidad microbiana. Dado que cada especie tiene su propio rango de tolerancia térmica, cualquier cambio en la temperatura opera como un filtro selectivo que favorece a ciertas especies en detrimento de otras, modificando así la dinámica de la sucesión y, en consecuencia, el perfil metabólico del sistema (Wu et al., 2023; Englezos et al., 2022). Este fenómeno se ha documentado extensamente en la producción de baijiu sauce-flavor, donde la temperatura de fermentación actúa como el principal

modulador de la diversidad microbiana en las capas de granos fermentados (Wu et al., 2023).

El Oxígeno y su Rol Regulador del Metabolismo Fermentativo

Junto a la temperatura, la disponibilidad de oxígeno es uno de los factores fisicoquímicos que mayor impacto tienen sobre el metabolismo de los microorganismos fermentativos. Su presencia o ausencia no simplemente "acelera" o "frena" la fermentación; más bien, determina cuál de los múltiples programas metabólicos disponibles ejecuta la célula microbiana en cada momento.

La lógica fundamental es la siguiente: el oxígeno es el aceptor final de electrones más eficiente que conoce la bioquímica celular. Cuando está disponible, los microorganismos que pueden usarlo –los aerobios facultativos y los aerobios obligados– priorizan la respiración por encima de la fermentación, porque la primera produce hasta 30-32 moléculas de ATP por glucosa, frente a las solas 2 que rinde la segunda. En ausencia de oxígeno, sin embargo, la respiración se vuelve imposible y el microorganismo se ve obligado a recurrir a la fermentación para regenerar el NAD^+ que necesita para mantener activa la glucólisis y –con ella– la producción mínima de ATP necesaria para su supervivencia (Banti et al., 2013; Eichhof & Ernst, 2016).

Bajo condiciones de hipoxia o anoxia, el cambio desde respiración hacia fermentación se produce a nivel genético: en levaduras como *S. cerevisiae*, genes clave de las rutas fermentativas como ADH1 (alcohol deshidrogenasa) y PDC (piruvato descarboxilasa) se activan por mecanismos regulatorios bien caracterizados que responden a la caída en la concentración de oxígeno. En bacterias facultativas como *E. coli*, reguladores globales como ArcBA y FNR reprograman masivamente la expresión génica para ajustar la proporción de

respiración y fermentación según la disponibilidad de oxígeno (Rolfe et al., 2011; Shan et al., 2012).

DATO CURIOSO *"El efecto Pasteur: cuando más oxígeno significa menos alcohol"* A finales del siglo XIX, Louis Pasteur observó un fenómeno paradójico: agregar oxígeno a una fermentación alcohólica reducía la producción de etanol. Este fenómeno, bautizado como "efecto Pasteur", se explica hoy perfectamente: en presencia de oxígeno, las levaduras desvían el carbono hacia la respiración (mucho más eficiente energéticamente) y reducen su flujo hacia la producción de etanol. Este conocimiento es crítico en enología: el nivel de oxígeno disponible durante la fermentación alcohólica determina directamente el rendimiento en etanol del vino.

A niveles intermedios de oxígeno –entre 0.5 y 2.8%– organismos facultativos como *S. cerevisiae* y *E. coli* exhiben un metabolismo mixto, denominado "respiro-fermentativo", en el que parte del NADH se reoxida respiratoriamente mientras otra parte utiliza las rutas fermentativas. Este estado permite un mayor rendimiento en biomasa que la fermentación pura, ya que el ATP generado por la respiración se puede destinar a la síntesis de nuevas células. En el otro extremo –cuando el oxígeno es abundante– la represión transcripcional de las enzimas fermentativas es casi completa en la mayoría de los organismos facultativos, salvo en los denominados organismos Crabtree-positivos –los cuales, bajo exceso de azúcar, mantienen la fermentación incluso en presencia de oxígeno, como ocurre con *S. cerevisiae* en condiciones industriales de alta concentración de glucosa (Imura et al., 2020; Hagman & Piškur, 2015).

Diferencias entre Fermentaciones Aeróbicas y Anaeróbicas

La distinción entre fermentaciones aeróbicas y anaeróbicas va mucho más allá de la simple presencia o ausencia de oxígeno; abarca diferencias profundas en rendimiento energético, rutas metabólicas activadas, productos finales y estructura de las comunidades microbianas que hacen posible el proceso. En

términos de rendimiento energético, la diferencia es dramática. Las rutas fermentativas anaeróbicas, al depender exclusivamente de la fosforilación a nivel de sustrato, producen entre 2 y 4 moléculas de ATP por mol de glucosa. Los procesos respiratorios asociados a la fermentación aeróbica, en cambio, pueden generar más de 30 moléculas de ATP por la misma cantidad de sustrato, gracias al aprovechamiento del gradiente electroquímico generado a través de la cadena de transporte de electrones (Buckel, 2021; Harrison et al., 2015).

Esta diferencia de rendimiento energético tiene consecuencias directas sobre el tipo de productos generados. En condiciones anaeróbicas, donde los electrones deben ser descargados sobre aceptores endógenos como el piruvato o el acetaldehído, los productos finales son compuestos orgánicos altamente reducidos: etanol, lactato, butirato, ácidos grasos volátiles o gases como el hidrógeno. En condiciones aeróbicas, el oxígeno actúa como aceptor de electrones externo, permitiendo la oxidación más completa del sustrato y generando productos más oxidados como el acetato y el CO₂, aunque en organismos Crabtree-positivos puede persistir la producción de etanol incluso bajo aerobiosis (Hagman & Piškur, 2015; Van Hoek & Merks, 2012).

Factores Químicos

El pH como Regulador del Proceso Fermentativo

Si la temperatura es el "termostato" que regula la velocidad del proceso fermentativo, el pH puede considerarse su "interruptor biológico": un parámetro capaz de determinar no solo qué tan rápido transcurre la fermentación, sino quién la ejecuta, qué rutas metabólicas se activan y qué productos se acumulan. La evidencia científica acumulada no deja margen a la duda: el pH es uno de los factores más determinantes en cualquier sistema fermentativo (Prado-Barragán et al., 2016; Yang et al., 2025).

El mecanismo primario por el cual el pH afecta la fermentación es su influencia sobre la actividad enzimática. Cada enzima tiene un pH óptimo en el que su estructura tridimensional –y en particular su sitio activo– mantiene la geometría necesaria para catalizar la reacción de manera eficiente. Desviaciones de ese pH óptimo alteran el estado de ionización de los residuos de aminoácidos que forman el sitio activo, reduciendo la afinidad por el sustrato y disminuyendo la velocidad de catálisis. En casos extremos –pH muy ácido o muy alcalino– la desnaturalización de las proteínas puede ser irreversible, bloqueando el metabolismo de manera permanente (Fadiya & Perillo, 2025; He et al., 2026).

Un segundo mecanismo, igualmente importante, involucra la permeabilidad celular y el transporte de nutrientes. El pH controla el potencial de membrana y la fuerza protón-motriz –el gradiente electroquímico que impulsa la síntesis de ATP y el transporte activo de solutos. En ambientes ácidos, los ácidos orgánicos en su forma no disociada pueden difundir pasivamente a través de la membrana lipídica y liberar su protón en el interior celular, forzando al microorganismo a gastar energía en expulsar los H⁺ acumulados mediante bombas de protones. Este gasto energético adicional reduce el rendimiento fermentativo y puede incluso llevar a la acidificación interna y la muerte celular (Jackson, 2008; Tomar et al., 2025).

DATO CURIOSO *"El pH como arma natural de las bacterias lácticas"* Las bacterias lácticas son auténticas maestras de la guerra bioquímica por el pH. Al fermentar azúcares y generar ácido láctico de manera masiva, acidifican el ambiente tan rápidamente que los microorganismos no acidotolerantes –incluidos la mayoría de los patógenos alimentarios– no pueden sobrevivir. Este mecanismo de "exclusión ácida" es la base de la seguridad biológica de productos fermentados como el kimchi, el chucrut, el yogur y el salami sin aditivos.

El pH también opera como un poderoso selector ecológico de la comunidad microbiana. Ambientes ácidos –con pH inferior a 5.5– favorecen a las bacterias lácticas homofermentativas y heterofermentativas, así como a las levaduras acidotolerantes, mientras que valores próximos a la neutralidad –pH 6.5-7.0– permiten el establecimiento de comunidades más diversas que incluyen *Clostridium*, *Bacillus* y una mayor variedad de levaduras (Ilhan et al., 2017; Ye et al., 2007). Esto explica la característica "autoselección" que ocurre en muchas fermentaciones espontáneas: a medida que las bacterias lácticas acidifican el medio, van eliminando progresivamente a sus propios competidores y dejando el campo libre para las etapas más especializadas del proceso.

Quizás el efecto más sofisticado del pH sobre la fermentación es su capacidad para desviar el tráfico metabólico entre rutas alternativas. En la fermentación oscura para producción de biohidrógeno, por ejemplo, valores de pH entre 4.5 y 6.0 favorecen las rutas que generan acetato y butirato como productos secundarios, mientras que valores más cercanos a la neutralidad orientan el metabolismo hacia la producción de alcoholes o propionato. En fermentaciones de síntesis gaseosa, el pH bajo puede desplazar el metabolismo desde la acidogénesis hacia la solventogénesis, aumentando significativamente la producción de etanol (Mohammadi et al., 2011). En la vinificación, el pH bajo inhibe el crecimiento de microorganismos competidores, estabiliza los compuestos fenólicos y condiciona la velocidad de la fermentación maloláctica (Jackson, 2008; Pan et al., 2011).

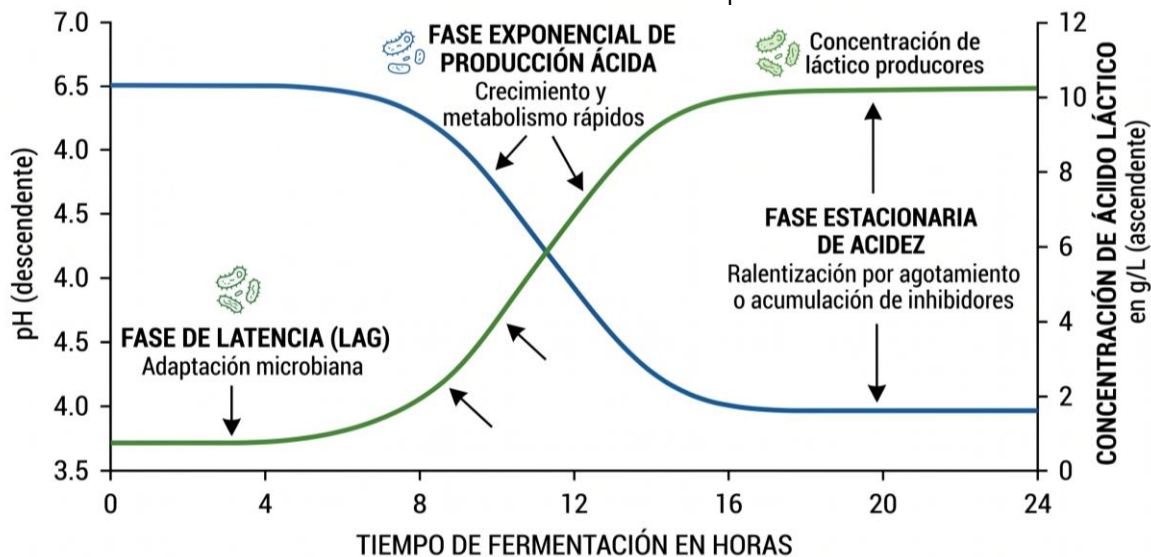
La Relación entre Producción de Ácidos y Disminución del pH

De los efectos del pH sobre la fermentación se desprende una relación causal de dirección contraria, igualmente fundamental: los propios microorganismos fermentativos son los agentes responsables de los cambios de pH que ocurren durante el proceso. Esta retroalimentación entre metabolismo microbiano y entorno fisicoquímico es uno de los mecanismos centrales que explican la

dinámica de la sucesión microbiana y la autoconservación de los alimentos fermentados.

El mecanismo es bioquímicamente directo: durante la fermentación, los microorganismos convierten carbohidratos y otros sustratos en ácidos orgánicos –principalmente ácido láctico, acético, cítrico y butírico– que se acumulan en el medio extracelular. Al tratarse de ácidos débiles, estos compuestos se disocian parcialmente, liberando protones (H^+) al medio y disminuyendo el pH de manera proporcional a su concentración y a su constante de disociación ácida (pK_a) (Luo et al., 2025; Ye et al., 2025).

Ilustración 4.2 Cinética de fermentación láctica: evolución del pH y la concentración de ácido láctico en función del tiempo.



Nota. La imagen representa la dinámica del pH y la concentración de ácido láctico durante un proceso de fermentación. Se identifican las fases de latencia, crecimiento exponencial y estabilización, evidenciando que el incremento de bacterias ácido-lácticas provoca una disminución progresiva del pH debido a la acumulación de ácido láctico.

Numerosos estudios confirman esta relación cuantitativa directa. En fermentaciones de kombucha, la producción sostenida de ácido acético, glucónico y láctico reduce el pH hasta valores de 2.34 a 3.37 en función del tiempo y la temperatura de incubación (Agustina et al., 2025; Tong et al., 2026). En fermentaciones lácticas controladas, el ácido láctico –con un pKa de 3.86– es el principal responsable de la reducción del pH por su elevada fuerza relativa comparada con el ácido acético (Fadiya & Perillo, 2025). El tipo de cepa empleada condiciona tanto la cantidad como el tipo de ácidos producidos; diferentes cepas de *Lactiplantibacillus plantarum* generan perfiles de acidificación notablemente distintos, lo que explica la variabilidad sensorial entre lotes producidos con el mismo sustrato y condiciones similares (Chen et al., 2026; Jin et al., 2026).

La acidificación progresiva, a su vez, modifica la ecología microbiana del sistema: cuando el pH cae por debajo de 4.5, la mayoría de los microorganismos patógenos y alterantes –cuyos rangos de crecimiento están centrados en torno a la neutralidad– son inhibidos o eliminados. Simultáneamente, el descenso del pH favorece la dominancia de los microorganismos más acidotolerantes y activa rutas metabólicas alternativas: en condiciones de mayor acidez, muchos microorganismos desvían el metabolismo desde la producción de ácido acético –menos reductor– hacia la de ácido butírico o compuestos más reducidos (Zheng et al., 2025; Wang et al., 2026).

Algunos trabajos incluso han logrado modelar matemáticamente la relación entre concentración de ácidos y pH en sistemas de fermentación vegetal, desarrollando ecuaciones de amortiguación del medio que permiten predecir el pH a partir de la concentración de ácidos orgánicos. Esta capacidad predictiva tiene valor práctico directo en el diseño y control de procesos fermentativos industriales.

La Actividad de Agua: Un Factor Crítico y a Menudo Subestimado

Junto al pH y la temperatura, la actividad de agua (a_w) completa la tríada de los factores fisicoquímicos más determinantes en la fermentación. La actividad de agua no mide la cantidad total de agua presente en un sistema, sino la fracción de agua disponible para participar en reacciones bioquímicas y para ser aprovechada por los microorganismos como solvente y sustrato. Esta distinción conceptual es fundamental: un alimento puede contener una elevada proporción de agua total y, sin embargo, tener una a_w baja si el agua está fuertemente retenida por solutos o adsorbida por matrices estructurales.

Cada grupo microbiano presenta un umbral mínimo de a_w por debajo del cual el crecimiento cesa. La mayoría de las bacterias patógenas –incluyendo *Salmonella*, *Staphylococcus aureus* y *Listeria monocytogenes*– requieren $a_w \geq 0.90-0.91$ para crecer activamente. Las levaduras son algo más tolerantes a la deshidratación, pudiendo crecer hasta a_w cercanos a 0.80. Los hongos filamentosos son los más resilientes, con algunos géneros xerófilos como *Aspergillus* o *Wallemia* capaces de crecer hasta a_w de 0.60 (Racioppo & Guerrieri, 2025; Wendt & Zhao, 2020). Esta diferencia en los umbrales mínimos explica por qué la fermentación y el secado funcionan como estrategias de conservación eficaces: al reducir la a_w del alimento por debajo del umbral de los patógenos –pero manteniéndola por encima del umbral de los microorganismos deseables– es posible favorecer la fermentación específica mientras se protege la seguridad del producto.

DATO CURIOSO “*El jamón serrano: arte de deshidratación controlada*” La producción de jamón serrano es un ejemplo paradigmático del control de la a_w como herramienta tecnológica. Durante el proceso de curación, la concentración de sal en la superficie del jamón extrae agua por diferencia de presión osmótica, reduciendo progresivamente la a_w . Esta reducción inhibe el crecimiento de bacterias patógenas y favorece la implantación de microbiota fúngica especializada –principalmente *Penicillium* y otros hongos xerófilos– que contribuyen al desarrollo del característico aroma y sabor del producto curado durante 12 a 36 meses.

La actividad de agua también modula directamente la actividad metabólica de los microorganismos ya establecidos. A baja aw, el estrés osmótico obliga a los microorganismos a invertir energía en la síntesis o acumulación de solutos compatibles –como glicerol, prolina o betaína– para equilibrar la presión osmótica interna, desviando recursos del metabolismo fermentativo hacia el osmoadaptación (Tenore & Klapper, 2026; Tapía et al., 2020). Esto explica por qué ajustes en la aw pueden acelerar o ralentizar la producción de ácidos, alcoholes, enzimas o compuestos aromáticos de manera tan significativa. En fermentaciones en estado sólido –como la producción de Daqu para el baijiu– la aw también controla la difusividad de sustratos y metabolitos en la matriz sólida, actuando como un regulador físico de la cinética del proceso.

A lo largo de la fermentación, la aw no permanece constante: con frecuencia disminuye por evaporación y por el aumento en la concentración de solutos producidos metabólicamente, aunque en algunos sistemas puede aumentar por la liberación de agua metabólica. Estos cambios dinámicos inducen a su vez cambios en la sucesión microbiana, seleccionando progresivamente a los microorganismos mejor adaptados a condiciones de menor aw (Yao et al., 2025; Ban et al., 2022). En este sentido, la aw actúa no solo como un parámetro de entrada del proceso, sino como un regulador dinámico y activo de la ecología microbiana de la fermentación.

Concentración de Sal y Azúcar: Reguladores Osmóticos de la Fermentación

Estrechamente ligados a la actividad de agua, la concentración de sal (NaCl) y la concentración de azúcar son dos factores cuya manipulación permite al tecnólogo de alimentos y al biotecnólogo ejercer un control preciso sobre la dinámica microbiana del proceso fermentativo. Ambos actúan

fundamentalmente a través de mecanismos osmóticos, aunque el alcance de sus efectos difiere en matices importantes.

La concentración de azúcar define, en primer lugar, la disponibilidad del sustrato energético para los microorganismos fermentativos. Sin embargo, su influencia va más allá de ser simplemente "más sustrato disponible". Concentraciones altas de sacarosa, glucosa o fructosa generan un estrés hiperosmótico que reduce el crecimiento celular y la actividad enzimática, porque el agua disponible para las reacciones biológicas disminuye a medida que aumenta la concentración de solutos. En levaduras, la inhibición se vuelve significativa a concentraciones superiores a 150 g/L de glucosa y condiciones potencialmente tóxicas se alcanzan por encima de 500 g/L (Huang et al., 2012; Ergun & Ferda Mutlu, 2000). Existe, por lo tanto, un rango óptimo de concentración de azúcar: suficiente para sostener una fermentación vigorosa, pero no tan elevado como para inhibir el crecimiento microbiano. Este equilibrio es especialmente relevante en la producción de vinos dulces, licores, bebidas fermentadas de alta graduación y en la producción de biocombustibles a partir de medios ricos en azúcares (Bragança et al., 2024).

El tipo de azúcar también importa: distintos carbohidratos activan diferentes rutas metabólicas y favorecen el crecimiento de grupos microbianos específicos. La glucosa y la fructosa son los sustratos más fácilmente fermentables, aprovechados directamente por la glucólisis. La sacarosa requiere una hidrólisis previa por acción de la invertasa o la sacarasa antes de poder ser metabolizada. Los almidones exigen la acción de amilasas extracelulares antes de que los azúcares simples resultantes puedan entrar al metabolismo fermentativo (Kushkevych, 2023; Darwin et al., 2018). Esta jerarquía de fermentabilidad tiene consecuencias directas sobre la sucesión microbiana y el perfil de productos de la fermentación.

La sal, por su parte, actúa principalmente como agente selectivo de la comunidad microbiana. Concentraciones bajas de NaCl –entre 1 y 2%– suelen favorecer el establecimiento y la dominancia de bacterias lácticas heterofermentativas como

Leuconostoc mesenteroides y Weissella confusa, que inician la fermentación con relativa rapidez y producen perfiles aromáticos complejos (Li et al., 2020; Liang et al., 2020). A medida que la concentración de sal aumenta, estos microorganismos relativamente sensibles son desplazados por bacterias lácticas más halotolerantes, como Lactiplantibacillus plantarum y, a concentraciones muy altas –por encima del 10%– por microorganismos extremadamente halófilos como Tetragenococcus halophilus, que es el protagonista de fermentaciones tradicionales como la del shoyu (salsa de soja japonesa) y la pasta de soja coreana.

El impacto de la sal sobre la calidad sensorial es igualmente pronunciado: concentraciones óptimas de sal favorecen el desarrollo de compuestos aromáticos deseables –ésteres, aldehídos, compuestos tiólicos– en fermentados vegetales y cárnicos, mientras que concentraciones excesivas pueden ralentizar la acidificación, inhibir la producción de estos compuestos y generar sabores planos o indeseados (Wang et al., 2021; Yang et al., 2021). Desde la perspectiva de la seguridad alimentaria, niveles de sal insuficientes –especialmente en combinación con una acidificación lenta– son factores de riesgo para la proliferación de patógenos como Listeria y Salmonella durante las fases iniciales de la fermentación.

Factores Nutricionales y Temporales

El Sustrato: Fundamento Energético y Ecológico de la Fermentación

Todo proceso fermentativo se asienta sobre una base material insustituible: el sustrato. El sustrato no es simplemente el "alimento" de los microorganismos; es el elemento que determina la identidad bioquímica de la fermentación, selecciona los actores microbianos, activa las rutas metabólicas relevantes y define, en última instancia, el perfil de productos que se obtendrán al final del proceso. Comprender el papel del sustrato equivale a comprender los cimientos sobre los que se construye cualquier fermentación.

Desde la perspectiva energética, el sustrato proporciona los compuestos carbonados que los microorganismos emplean como fuente de electrones y esqueleto carbónico para la biosíntesis de metabolitos. Sin un sustrato adecuado en calidad y cantidad, los microorganismos no pueden crecer, mantener su actividad enzimática ni producir los metabolitos de interés (Tomar et al., 2025; Li et al., 2024). La energía que los microorganismos extraen del sustrato –mediante glicolisis, rutas de las pentosas fosfato, betaoxidación u otras rutas catabólicas– se invierte tanto en el mantenimiento celular como en la síntesis de nuevas macromoléculas y en la producción de los compuestos que dan valor al producto fermentado.

La composición bioquímica del sustrato también actúa como un filtro selectivo de la comunidad microbiana. Cada microorganismo posee un repertorio específico de enzimas degradativas que le permiten metabolizar ciertos sustratos y no otros; un sustrato rico en almidón favorecerá el crecimiento de microorganismos amilolíticos, mientras que un sustrato rico en proteínas favorecerá a los proteolíticos. La relación carbono/nitrógeno (C/N) del sustrato es otro parámetro crítico: una relación C/N elevada puede limitar el crecimiento microbiano por deficiencia de nitrógeno, mientras que una relación C/N baja puede provocar la acumulación de amoníaco con potenciales efectos inhibitorios (Perdani et al., 2020; Hu et al., 2025).

DATO CURIOSO *“El papel del café como sustrato para las levaduras”* En la fermentación de café cereza, los microorganismos no fermentan el grano mismo, sino la pulpa mucilaginososa que lo rodea, rica en pectinas, azúcares y compuestos nitrogenados. Las diferentes cepas de levaduras y bacterias que colonizan esta pulpa producen ácidos orgánicos y alcoholes que difunden hacia el interior del grano, modificando los precursores del aroma. Por eso, cambiar ligeramente la composición del mucílago –mediante diferentes variedades de café, alturas de cultivo o condiciones de cosecha– puede generar perfiles de sabor radicalmente distintos en el grano fermentado.

En sistemas de fermentación industrial, la selección y optimización del sustrato está directamente ligada a la eficiencia económica del proceso. Sustratos complejos como el bagazo de caña, los residuos de café o las aguas de destilería requieren etapas de pretratamiento antes de ser fermentables, lo que añade costos y complejidad operativa. Sustratos simples como la glucosa o la melaza, en cambio, son directamente aprovechables, pero pueden resultar económicamente más costosos a gran escala (Ho Ahn et al., 2023; Hu et al., 2025). La búsqueda de sustratos de bajo costo –residuos agroindustriales, subproductos de la industria alimentaria– es uno de los ejes centrales de la investigación en biotecnología de fermentaciones sostenibles.

Cómo el Tipo de Carbohidrato Condiciona la Fermentación

De todos los componentes del sustrato, los carbohidratos son los más directamente relevantes para la fermentación, ya que constituyen la principal fuente de energía para la gran mayoría de los microorganismos fermentativos. Sin embargo, no todos los carbohidratos son iguales: su estructura molecular, su grado de polimerización y el tipo de enlaces glucosídicos que los unen determinan de manera determinante quién puede utilizarlos, a qué velocidad y con qué productos.

Los azúcares simples –glucosa, fructosa y galactosa– son los más directamente fermentables, ya que pueden entrar directamente a la glucólisis sin necesidad de degradación previa. La sacarosa, compuesta por glucosa y fructosa, requiere la acción de una sacarasa o invertasa para ser hidrolizada antes del metabolismo fermentativo, lo que la hace ligeramente menos eficiente que los monosacáridos. Los almidones y los fructooligosacáridos deben ser degradados por amilasas o fructanasas extracelulares antes de poder ser asimilados, y esta etapa de degradación puede ser el paso limitante de la velocidad en sistemas donde la producción enzimática es insuficiente (Zhu et al., 2023; Darwin et al., 2018).

La estructura del carbohidrato también determina la fermentabilidad selectiva por parte de grupos microbianos específicos. Los xilooligosacáridos y arabinosilanos, por ejemplo, son preferentemente fermentados por lactobacilos y bifidobacterias específicas que poseen enzimas xilolíticas, mientras que otros microorganismos intestinales son incapaces de metabolizarlos (Zhao et al., 2024; Cummings et al., 2001). Esta selectividad es precisamente el principio sobre el que se basa el concepto de prebiótico: un carbohidrato que, al no ser digerible por el huésped humano, llega intacto al colon y estimula selectivamente el crecimiento de microorganismos beneficiosos.

DATO CURIOSO *“Los fructooligosacáridos como alimento de las bifidobacterias”* Los fructooligosacáridos (FOS) presentes en la alcachofa de Jerusalén, la raíz de achicoria y el ajo no pueden ser hidrolizados por las enzimas digestivas humanas. Al llegar al intestino grueso, actúan como sustrato preferencial para las bifidobacterias, microorganismos considerados beneficiosos para la salud intestinal. Este es un ejemplo perfecto de cómo la estructura del carbohidrato determina qué microorganismos "ganan" la fermentación en el colon humano.

Los cambios en el perfil de carbohidratos disponibles a lo largo de la fermentación también modulan la composición de la comunidad microbiana. En el baijiu sauce-flavor, se ha documentado cómo el azúcar disponible regula la diversidad metabólica de la comunidad fermentativa: conforme los azúcares simples se agotan, la dominancia microbiana se desplaza hacia organismos capaces de degradar carbohidratos más complejos, alterando simultáneamente el perfil de compuestos volátiles del producto (Wang et al., 2021; Xian et al., 2026).

Qué Ocurre cuando el Sustrato se Agota

En una fermentación de tipo batch –es decir, aquella en la que el sustrato se añade al inicio y no se repone durante el proceso– el agotamiento del sustrato es un evento inevitable que marca el final del proceso productivo. Sin embargo, la cantidad y complejidad de los cambios que ocurren en los microorganismos durante y después de este agotamiento van mucho más allá de simplemente "detenerse".

El primer efecto del agotamiento del sustrato es la caída abrupta de la actividad metabólica y energética. Cuando la concentración de sustrato cae por debajo del umbral mínimo necesario para sostener el flujo glucolítico, el gradiente de piruvato disminuye, la producción de ATP se reduce y la actividad de las hidrogenasas, lacto-deshidrogenasas y otros complejos enzimáticos clave cae de manera drástica (Tiwari et al., 2025; Asim et al., 2026). La célula entra en un estado de "hambre" en el que toda la energía disponible se destina al mantenimiento de funciones vitales mínimas.

En respuesta a esta limitación energética, los microorganismos pueden modificar significativamente su programa metabólico. Bacterias capaces de sintetizar y acumular polihidroxicanoatos (PHA) –polímeros de reserva intracelular– comienzan a degradar estas reservas como fuente de carbono y energía de emergencia (Díaz-Domínguez et al., 2026). Otros organismos suprimen la expresión de enzimas costosas y activan rutas de reciclaje de proteínas y ácidos nucleicos mediante autoprocesos de autólisis controlada (Sun et al., 2024).

DATO CURIOSO *"El Fed-Batch: cómo los ingenieros resolvieron el problema del agotamiento"* La solución biotecnológica al problema del agotamiento del sustrato no fue simplemente aumentar la concentración inicial (que causaría inhibición osmótica), sino desarrollar el modo de operación "fed-batch": en lugar de agregar todo el sustrato al inicio, se añade de forma continua o en pulsos, manteniendo la concentración de sustrato en el rango óptimo durante toda la fermentación. Este modo de operación, hoy estándar en la producción industrial de insulina, antibióticos, aminoácidos y enzimas, permite duplicar o triplicar los rendimientos en comparación con los procesos batch convencionales.

La acumulación de productos tóxicos –desde el etanol hasta los ácidos grasos de cadena corta– suele coincidir con la fase de agotamiento del sustrato, amplificando el estrés celular y acelerando la caída de la viabilidad microbiana. Simultáneamente, el agotamiento del sustrato modifica la composición de la comunidad microbiana: los microorganismos capaces de utilizar los productos de degradación o las células muertas de sus vecinos –los llamados oligotróficos secundarios– ganan protagonismo cuando los fermentadores primarios pierden actividad (Li et al., 2007; Guo et al., 2024).

El Tiempo de Fermentación y su Relación con la Calidad del Producto

Si el sustrato define el "qué" de la fermentación, el tiempo define el "cuánto": cuánta transformación bioquímica ha ocurrido, hasta qué punto ha madurado la comunidad microbiana, cuántos metabolitos de interés se han acumulado y en qué fase de la sucesión se encuentra el proceso. El tiempo de fermentación es, por lo tanto, uno de los factores más determinantes de la calidad final del

producto, aunque su relación con esta calidad no es lineal sino dependiente de las características específicas de cada sistema.

En términos de transformaciones bioquímicas, el tiempo controla la magnitud de los procesos de proteólisis, lipólisis, glicolisis y biotransformación de compuestos fenólicos que dan lugar a los atributos nutritivos, funcionales y sensoriales del alimento fermentado. Incrementos moderados en el tiempo de fermentación suelen aumentar la liberación de compuestos bioactivos –como péptidos bioactivos, polifenoles transformados y vitaminas del grupo B– al facilitar la degradación de las matrices celulares del sustrato por parte de las enzimas microbianas. Tiempos óptimos definidos para cada sistema –por ejemplo, 24 a 48 horas para bebidas de mijo o 96 horas para la fermentación del cacao– maximizan la concentración de compuestos deseables y minimizan la de metabolitos negativos (Tomar et al., 2025; Escobar Parra et al., 2021).

Desde la perspectiva de la seguridad microbiológica, el tiempo también juega un papel crítico pero bidireccional. En etapas tempranas –generalmente las primeras 24 a 48 horas– la rápida acidificación producida por las bacterias lácticas elimina la mayoría de los patógenos potenciales, estableciendo una barrera microbiológica protectora. Sin embargo, fermentaciones prolongadas más allá del tiempo óptimo pueden crear condiciones de agotamiento de nutrientes y acumulación de metabolitos inhibitorios que paradójicamente favorecen la proliferación de microorganismos oportunistas o la reemergencia de patógenos resistentes (Zhu et al., 2024).

La dimensión sensorial de la relación tiempo-calidad es quizás la más evidente y la más valorada por el consumidor. En la producción de café especial, tiempos intermedios de fermentación –dependientes de la temperatura, la variedad y el método de procesamiento– generan perfiles aromáticos más complejos y frutales que los tiempos muy cortos (pobres en complejidad) o muy largos (con presencia de defectos fermentativos) (Palumbo et al., 2024; Álvarez Lizcano & Bahamón-

Monje, 2026). En la kombucha, la fermentación más allá del umbral óptimo – generalmente 7 a 14 días a temperatura ambiente– produce sabores avinagrados por exceso de ácido acético que, aunque no perjudican la seguridad del producto, lo hacen inaceptable para la mayoría de los consumidores. En los productos lácteos y cárnicos fermentados, el tiempo óptimo mejora la red proteica, la retención de agua y la textura, mientras que tiempos excesivos producen texturas blandas por exceso de proteólisis o acumulación de sabores amargos (Xu et al., 2021; Zhao et al., 2021).

En definitiva, el tiempo de fermentación no tiene un valor universal óptimo: cada sustrato, cada comunidad microbiana y cada objetivo de producto define su propia ventana de tiempo ideal. La capacidad del tecnólogo para identificar y controlar ese momento óptimo –mediante análisis fisicoquímicos, microbiológicos y sensoriales en línea– es una de las competencias más valiosas y complejas de la biotecnología de fermentaciones.

Referencias

- Adebo, O. A. (2025). Food metabolomics for understanding metabolite modifications in cereal products. En *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 117, pp. 237-263). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2025.07.003>
- Adesulu-Dahunsi, A. T., Dahunsi, S. O., & Ajayeoba, T. A. (2022). Co-occurrence of Lactobacillus Species During Fermentation of African Indigenous Foods: Impact on Food Safety and Shelf-Life Extension. *Frontiers in Microbiology*, 13, 684730. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.684730>
- Agostini, L., Moreira, J. C. F., Bendia, A. G., Kmit, M. C. P., Waters, L. G., Santana, M. F. M., Sumida, P. Y. G., Turra, A., & Pellizari, V. H. (2021). Deep-sea plastisphere: Long-term colonization by plastic-associated bacterial and archaeal communities in the Southwest Atlantic Ocean. *Science of The Total Environment*, 793, 148335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148335>
- Akın, M., Eydurán, S. P., Negi, N. P., Yılmaz, B., Yıldırım, K., Papageorgiou, M., & Rocha, J. M. (2025). Functional and health-promoting properties of acid-tolerant yeasts from sourdough-based and other agro-food products. En *Handbook of Sourdough Microbiota and Fermentation* (pp. 183-201). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18622-6.00010-4>
- Alaguthevar, R., Pawale, A. V., Murugesan, B., Khan, A., Rhim, J.-W., & Chelladurai, D. (2025). Comprehensive review of food Archaeome: Exploring the understudied microbiome and health benefits of fermented foods. *Microbial Pathogenesis*, 205, 107718. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2025.107718>
- Alfaia, C. M., Patarata, L., & Fraqueza, M. J. D. R. (2024). Antioxidant compounds from fermentation and microbial sources. En *Natural Antioxidants to Enhance the Shelf-Life of Food* (pp. 215-252). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15386-0.00008-4>
- Amir Ashraf, S., & Adnan, M. (Eds.). (2025). *Food bioactives and nutraceuticals: Dietary medicine for human health and well-beings*. Springer.

- Anupma, A., & Tamang, J. P. (2020). Diversity of Filamentous Fungi Isolated From Some Amylase and Alcohol-Producing Starters of India. *Frontiers in Microbiology*, 11, 905. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00905>
- Araújo, L. P., Vilela, H., Solinho, J., Pinheiro, R., Belo, I., & Lopes, M. (2024). Enrichment of Fruit Peels' Nutritional Value by Solid-State Fermentation with *Aspergillus ibericus* and *Rhizopus oryzae*. *Molecules*, 29(15), 3563. <https://doi.org/10.3390/molecules29153563>
- Auchtung, J. M., Hallen-Adams, H. E., & Hutkins, R. (2025). Microbial interactions and ecology in fermented food ecosystems. *Nature Reviews Microbiology*, 23(10), 622-634. <https://doi.org/10.1038/s41579-025-01191-w>
- Banchi, E., Corre, E., Del Negro, P., Celussi, M., & Malfatti, F. (2023). Genome-resolved metagenomics of Venice Lagoon surface sediment bacteria reveals high biosynthetic potential and metabolic plasticity as successful strategies in an impacted environment. *Marine Life Science & Technology*, 6(1), 126-142. <https://doi.org/10.1007/s42995-023-00192-z>
- Begum, P. S., Rajagopal, S., & Razak, M. A. (2021). Emerging trends in microbial fermentation technologies. En *Recent Developments in Applied Microbiology and Biochemistry* (pp. 113-119). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821406-0.00011-4>
- Bhattacharjee, A., Thompson, A. M., Schwarz, K. C., Burnet, M. C., Kim, Y.-M., Nunez, J. R., Fansler, S. J., Farris, Y., Brislawn, C. J., Metz, T. O., McClure, R. S., Renslow, R. S., Shor, L., Jansson, J. K., Hofmockel, K. S., & Anderton, C. R. (2020). Soil microbial EPS resiliency is influenced by carbon source accessibility. *Soil Biology and Biochemistry*, 151, 108037. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108037>
- Bigey, F., Segond, D., Friedrich, A., Guezenc, S., Bourgais, A., Huyghe, L., Agier, N., Nidelet, T., & Sicard, D. (2021). Evidence for Two Main Domestication Trajectories in *Saccharomyces cerevisiae* Linked to Distinct Bread-Making Processes. *Current Biology*, 31(4), 722-732.e5. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.11.016>
- Böck, A. (2009). Fermentation. En *Encyclopedia of Microbiology* (pp. 132-144). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012373944-5.00074-2>

- Caffrey, E. B., Sonnenburg, J. L., & Devkota, S. (2024). Our extended microbiome: The human-relevant metabolites and biology of fermented foods. *Cell Metabolism*, 36(4), 684-701. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2024.03.007>
- Cai, H., Tao, L., Zhou, X., Liu, Y., Sun, D., Ma, Q., Yu, Z., & Jiang, W. (2024). Lactic acid bacteria in fermented fish: Enhancing flavor and ensuring safety. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101206. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101206>
- Carrillo-Garmendia, A., Martinez-Ortiz, C., Martinez-Garfias, J. G., Suarez-Sandoval, S. E., González-Hernández, J. C., Nava, G. M., Dufoo-Hurtado, M. D., & Madrigal-Perez, L. A. (2022). Snf1p/Hxk2p/Mig1p pathway regulates hexose transporters transcript levels, affecting the exponential growth and mitochondrial respiration of *Saccharomyces cerevisiae*. *Fungal Genetics and Biology*, 161, 103701. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2022.103701>
- Casimiro, L. K. S., Bressani, A. P. P., Faria, L. D. G., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2025). Exploring the potential of *Saccharomyces cerevisiae* CCMA 2122 and *Pichia kluyveri* CCMA 0615 for low-alcohol beer production. *Food Bioscience*, 74, 107955. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.107955>
- Chen, J., Zhang, Y., Luo, X., Zeng, Y., Xiao, P., Ding, X., Qiu, S., Li, Q., Deng, Q., Wang, S., Lin, R., Chen, X., Yang, D., & Yan, W. (2025). Nanotherapies based on bacterial metabolism: Mechanisms, design and application. *Materials Today Bio*, 34, 102117. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2025.102117>
- Chen, P. (2021). Lactic Acid Bacteria in Fermented Food. En *Advances in Probiotics* (pp. 397-416). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822909-5.00024-1>
- Cheng, Z., Yang, J., Yan, R., Wang, B., Bai, Y., Miao, Z., Sun, J., Li, H., Wang, X., & Sun, B. (2025). Interactive mechanism-guided microbial interaction dynamics in food fermentations: Lactic acid bacteria and yeasts as a case example. *Food Bioscience*, 68, 106453. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106453>
- Choudhury, N. D., Bhuyan, N., Narzari, R., Saikia, R., Seth, D., Saha, N., & Kataki, R. (2021). Various conversion techniques for the recovery of value-added products from tea

- waste. En Valorization of Agri-Food Wastes and By-Products (pp. 237-265). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824044-1.00015-5>
- De Jesus, L. C. L., Da Silva, T. F., Glória, R. D. A., Freitas, A. D. S., Américo, M. F., Fernandes, L. J. D. S., Campos, G. M., Gomes, G. C., Santos, R. C. V., Carvalho, R. D. D. O., Barh, D., & Azevedo, V. (2022). Lactic acid bacteria-based beverages in the promotion of gastrointestinal tract health. En *Microbiome, Immunity, Digestive Health and Nutrition* (pp. 373-385). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822238-6.00008-X>
- de Jong, M., Alekseeva, A. Y., Miraji, K. F., Phiri, S., Linnemann, A. R., & Schoustra, S. E. (2022). Environmental Selection Shapes Bacterial Community Composition in Traditionally Fermented Maize-Based Foods from Benin, Tanzania and Zambia. *Microorganisms*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10071354>
- De Souza, E. L., De Oliveira, K. Á., & De Oliveira, M. E. (2023). Influence of lactic acid bacteria metabolites on physical and chemical food properties. *Current Opinion in Food Science*, 49, 100981. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100981>
- de Souza Sevalho, E., Fonseca, M. D. P., da Silva Filho, F. A., Fernandes, K. R. P., dos Banhos, E. F., Paulino, B. N., de Souza, A. Q. L., & de Souza, A. D. L. (2025). Limonene Biotransformation Mediated by Filamentous Fungi from the Brazilian Amazon. *Indian Journal of Microbiology*, 65(3), 1696-1702. <https://doi.org/10.1007/s12088-024-01428-x>
- Del-Bosque, D., Vila-Crespo, J., Ruipérez, V., Fernández-Fernández, E., & Rodríguez-Nogales, J. M. (2026). Integrated enzymatic-yeast biostrategy to obtain reduced-alcohol wine. *Food Research International*, 231, 118699. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2026.118699>
- Desvignes, P., Ruiz, P., Guillot, L., Danon, J., Durand, A., Beaumont, M., Chaucheyras-Durand, F., & Forano, E. (2025). Transcriptomic analysis of the interactions between *Fibrobacter succinogenes* S85, *Selenomonas ruminantium* PC18 and a live yeast strain used as a ruminant feed additive. *BMC Genomics*, 26(1), 721. <https://doi.org/10.1186/s12864-025-11894-2>

- Dmytruk, O., Yemets, A., & Dmytruk, K. (2025). Yeasts as Biofertilizers and Biocontrol Agents: Mechanisms and Applications. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, bab.70029. <https://doi.org/10.1002/bab.70029>
- Fenchel, T., King, G. M., & Blackburn, T. H. (2012). Bacterial Metabolism. En *Bacterial Biogeochemistry* (pp. 1-34). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415836-8.00001-3>
- Ferreira, L. M. R., Li, A. M., Serafim, T. L., Sobral, M. C., Alpoim, M. C., & Urbano, A. M. (2020). Intermediary metabolism: An intricate network at the crossroads of cell fate and function. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Basis of Disease*, 1866(10), 165887. <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2020.165887>
- Finster, K. (2008). Anaerobic Bacteria and Archaea in Cold Ecosystems. En R. Margesin, F. Schinner, J.-C. Marx, & C. Gerday (Eds.), *Psychrophiles: From Biodiversity to Biotechnology* (pp. 103-119). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74335-4_7
- Fitsum, S., Gebreyohannes, G., & Sbhatu, D. B. (2025). Bioactive compounds in fermented foods: Health benefits, safety, and future perspectives. *Applied Food Research*, 5(2), 101097. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101097>
- Fytsilis, V. D., Urlings, M. J. E., Van Schooten, F.-J., De Boer, A., & Vrolijk, M. F. (2024). Toxicological risks of dairy proteins produced through cellular agriculture: Current state of knowledge, challenges and future perspectives. *Future Foods*, 10, 100412. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100412>
- Gabriele, M., & Pucci, L. (2022). Fermentation and germination as a way to improve cereals antioxidant and antiinflammatory properties. En *Current Advances for Development of Functional Foods Modulating Inflammation and Oxidative Stress* (pp. 477-497). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823482-2.00014-5>
- Garcia, C., & Remize, F. (2022). Lactic acid fermentation of fruit and vegetable juices and smoothies: Innovation and health aspects. En *Lactic Acid Bacteria in Food Biotechnology* (pp. 27-46). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89875-1.00008-0>

- Gautam, A., Poopalarajah, R., Ahmad, A. R., Rana, B. N., Deneke, T. W., Ahn, N., Utenova, L., Kunwor, Y. S., Bhandari, N. N., & Jha, A. R. (2025). Ecological factors that drive microbial communities in culturally diverse fermented foods. *BMC Microbiology*, 25(1), 655. <https://doi.org/10.1186/s12866-025-04413-6>
- Giannakou, K., Cotterrell, M., & Delneri, D. (2020). Genomic Adaptation of *Saccharomyces* Species to Industrial Environments. *Frontiers in Genetics*, 11. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00916>
- Gmoser, R., Fristedt, R., Larsson, K., Undeland, I., Taherzadeh, M. J., & Lennartsson, P. R. (2020). From stale bread and brewers spent grain to a new food source using edible filamentous fungi. *Bioengineered*, 11(1), 582-598. <https://doi.org/10.1080/21655979.2020.1768694>
- González De Llano, D., Rodríguez-Saavedra, M., & Moreno-Arribas, M. V. (2025). Craft beer safety: Control of critical points of the production process. En *Craft Beer* (pp. 193-212). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-16015-8.00009-5>
- Gourama, H., & Fung, D. Y. C. (2024). Yeasts and molds. En *Encyclopedia of Meat Sciences* (pp. 308-321). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85125-1.00188-5>
- Groenenboom, A. E., van den Heuvel, J., Zwaan, B. J., Smid, E. J., & Schoustra, S. E. (2022). Species dynamics in natural bacterial communities over multiple rounds of propagation. *Evolutionary Applications*, 15(11), 1766-1775. <https://doi.org/10.1111/eva.13470>
- Guo, T., Zhou, X., Zhao, S., Yao, Y., Dong, B., & Zhao, G. (2025). Microbiota interactions as critical determinants of flavor development in fermented foods. *Trends in Food Science & Technology*, 164, 105218. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105218>
- He, W., Wang, M., Zhou, T., Fu, S., Chen, K., Ding, Y., & Zhou, X. (2026). Metabolomic investigation of flavor and metabolite evolutions in the submerged fermentation of miiuy croaker (*Miichthys miiuy*) surimi induced by *Monascus purpureus*. *Food Chemistry*, 509, 148536. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2026.148536>
- He, Y., Degraeve, P., & Oulahal, N. (2024). Bioprotective yeasts: Potential to limit postharvest spoilage and to extend shelf life or improve microbial safety of

processed foods. *Heliyon*, 10(3), e24929.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24929>

Hocking, M. B. (2005). Fermentation and other Microbiological Processes. En *Handbook of Chemical Technology and Pollution Control* (pp. 505-556e). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-012088796-5/50019-3>

Hutchinson, T. F., Kessler, A. J., Wong, W. W., Hall, P., Leung, P. M., Jirapanjawat, T., Greening, C., Glud, R. N., & Cook, P. L. M. (2024). Microorganisms oxidize glucose through distinct pathways in permeable and cohesive sediments. *The ISME Journal*, 18(1), wrae001. <https://doi.org/10.1093/ismejo/wrae001>

Imura, M., Nitta, K., Iwakiri, R., Matsuda, F., Shimizu, H., & Fukusaki, E. (2020). Comparison of metabolic profiles of yeasts based on the difference of the Crabtree positive and negative. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 129(1), 52-58.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2019.07.007>

Intasit, R., Cheirsilp, B., Suyotha, W., & Boonsawang, P. (2021). Synergistic production of highly active enzymatic cocktails from lignocellulosic palm wastes by sequential solid state-submerged fermentation and co-cultivation of different filamentous fungi. *Biochemical Engineering Journal*, 173, 108086.
<https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108086>

Jackson, R. S. (2020). Fermentation. En *Wine Science* (pp. 461-572). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816118-0.00007-6>

Jameel, M. K., Mustafa, M. A., Ahmed, H. S., Mohammed, A. J., Ghazy, H., Shakir, M. N., Lawas, A. M., Mohammed, S. K., Idan, A. H., Mahmoud, Z. H., Sayadi, H., & Kianfar, E. (2024). Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. *Results in Chemistry*, 7, 101549.
<https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101549>

Jayan, H., Zhou, R., Zheng, Y., Xue, S., Yin, L., El-Seedi, H. R., Zou, X., & Guo, Z. (2025). Microfluidic-SERS platform with in-situ nanoparticle synthesis for rapid *E. coli* detection in food. *Food Chemistry*, 471, 142800.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.142800>

- Khorshidian, N., Yousefi, M., Meybodi, N. M., & Mortazavian, A. M. (2021). Starter cultures for probiotic beverages: A comparative study of traditional and modern approaches. En *Probiotic Beverages* (pp. 259-284). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818588-9.00018-8>
- Kouakou-Kouamé, A. C., N'guessan, F. K., Montet, D., & Djè, M. K. (2023). Production of flavor compounds by lactic acid bacteria in fermented foods. En *Lactic Acid Bacteria as Cell Factories* (pp. 239-270). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91930-2.00009-2>
- Kushkevych, I. (2023). Bacterial Metabolism. En *Bacterial Physiology and Biochemistry* (pp. 159-310). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18738-4.50005-X>
- Lin, L., Du, R., Wang, Y., Wu, Q., & Xu, Y. (2022). Regulation of auxotrophic lactobacilli growth by amino acid cross-feeding interaction. *International Journal of Food Microbiology*, 377, 109769. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109769>
- Louw, N. L., Lele, K., Ye, R., Edwards, C. B., & Wolfe, B. E. (2023). Microbiome Assembly in Fermented Foods. *Annual Review of Microbiology*, 77(Volume 77, 2023), 381-402. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-032521-041956>
- Lu, Y., He, J., Cao, J., Dang, Y., Sun, Y., & Pan, D. (2021). Effect of fermentation by various bacterial strains on quality of dried duck meat slice. *International Journal of Food Engineering*, 17(2), 121-129. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0076>
- Luo, S., Zhang, J., Sun, J., Zhao, T., Deng, J., & Yang, H. (2024). Future development trend of food-borne delivery systems of functional substances for precision nutrition. En *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 112, pp. 385-433). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2024.05.007>
- Ma, X., Zhou, B., Jiang, L., Xie, M., Rong, Z., Yin, S., Wang, F., Liu, Y., & Li, X. (2025). Microbial interactions between *Lactiplantibacillus plantarum* and *Rhodotorula mucilaginosa* in the fermented fish juice system. *Food Research International*, 208, 116166. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116166>
- Martín-Miguélez, J. M., Martín, I., Peromingo, B., Delgado, J., & Córdoba, J. J. (2025). Pathogen and Spoilage Microorganisms in Meat and Dairy Analogues:

- Occurrence and Control Strategies. *Foods*, 14(10), 1819.
<https://doi.org/10.3390/foods14101819>
- Martins, L. C., Monteiro, C. C., Semedo, P. M., & Sá-Correia, I. (2020). Valorisation of pectin-rich agro-industrial residues by yeasts: Potential and challenges. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(15), 6527-6547.
<https://doi.org/10.1007/s00253-020-10697-7>
- Mbuyane, L. L., Bauer, F. F., & Divol, B. (2021). The metabolism of lipids in yeasts and applications in oenology. *Food Research International*, 141, 110142.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110142>
- Molelekoa, T. B. J., Regnier, T., Silva, L. S. da, & Augustyn, W. (2021). Production of Pigments by Filamentous Fungi Cultured on Agro-Industrial by-Products Using Submerged and Solid-State Fermentation Methods. *Fermentation*, 7(4).
<https://doi.org/10.3390/fermentation7040295>
- Mukherjee, A., Farsi, D. N., Garcia-Gutierrez, E., Akan, E., Millan, J. A. S., Angelovski, L., Bintsis, T., Gérard, A., Güley, Z., Kabakçı, S., Kahala, M., Merabti, R., Pavli, F., Salvetti, E., Karagözlü, C., Bağlam, N., Hyseni, B., Bavaro, S., Papadimitriou, K., ... Mojsova, S. (2025). Impact of fermented foods consumption on gastrointestinal wellbeing in healthy adults: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1668889. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1668889>
- Najafpour-Darzi, G. (2025). Biological treatment. En *Biochemical Engineering and Biotechnology* (pp. 623-661). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-33096-4.00025-9>
- Nemo, R., & Bacha, K. (2020). Microbial, physicochemical and proximate analysis of selected Ethiopian traditional fermented beverages. *LWT*, 131, 109713.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109713>
- Niu, C., Xing, X., Zuo, W., Zuo, Z., Liu, F., Liu, C., & Li, Q. (2024). Construction and application of a synthetic microbial community in reduced salinity fermentation of raw-materials based broad bean paste. *Food Bioscience*, 61, 104851.
<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104851>

- Nout, M. J. R. (2024). Fermentation. En *Encyclopedia of Food Safety* (pp. 499-509). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822521-9.00130-1>
- Odeyemi, O. A., Alegbeleye, O. O., Strateva, M., & Stratev, D. (2020). Understanding spoilage microbial community and spoilage mechanisms in foods of animal origin. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(2), 311-331. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12526>
- Ogawa, M., García-Martínez, T., Bisson, L., Mauricio, J. C., Moreno, J., & Moreno-García, J. (2020). Mapping the intracellular metabolome of yeast biocapsules—Spherical structures of yeast attached to fungal pellets. *New Biotechnology*, 58, 55-60. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.05.003>
- Ostrowski, G., Jaworska, D., Kasałka-Czarna, N., Montowska, M., Muszewska, A., Płecha, M., Przybylski, W., Sawicki, K., Słowik, Ł., & Pawłowska, J. (2026). The effect of fungal proteolytic enzymes on myofibrillar proteins in dry-aged beef. *LWT*, 243, 119179. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2026.119179>
- Pak, J., Park, H., Baek, K., Son, H.-S., & Kwak, S. (2025). Yeast-based precision fermentation for the biosynthesis of terpenoids. *Future Foods*, 12, 100752. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100752>
- Parchami, M., Ferreira, J. A., & Taherzadeh, M. J. (2021). Starch and protein recovery from brewer's spent grain using hydrothermal pretreatment and their conversion to edible filamentous fungi - A brewery biorefinery concept. *Bioresource Technology*, 337, 125409. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125409>
- Pavličková, Z., Jirků, K., Zimmelová, E., Hurtado, L. H., Gentekaki, E., & Tsaousis, A. D. (2026). Blastocystis in domestic mammals and poultry: From prevalence patterns to gut physiology. *Trends in Parasitology*, 42(2), 127-137. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2025.12.001>
- Peraza, R., & Perron, G. G. (2022). Investigating the microbial terroir of fermented foods produced in a professional kitchen. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 28, 100509. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100509>
- Pereira, G. V. D. M., De Mello Sampaio, V., Wiele, N., Da Silva Vale, A., De Carvalho Neto, D. P., Souza, A. D. F. D. D., Nogueira Dos Santos, D. V., Ruiz, I. R., Rogez, H., &

- Soccol, C. R. (2024). How yeast has transformed the coffee market by creating new flavors and aromas through modern post-harvest fermentation systems. *Trends in Food Science & Technology*, 151, 104641. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104641>
- Pramana, A., Firmanda, A., Arnata, I. W., Sartika, D., & Sari, E. O. (2024). Reduction of biofilm and pathogenic microorganisms using curcumin-mediated photodynamic inactivation to prolong food shelf-life. *International Journal of Food Microbiology*, 425, 110866. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110866>
- Pujato, S. A., Quiberoni, A. D. L., & Guglielmotti, D. M. (2022). Characterization of Bacteriocins Produced by Lactic Acid Bacteria of Industrial Interest. En V. K. Gupta, S. D. Sarker, M. Sharma, M. E. Pirovani, Z. Usmani, & C. Jayabaskaran (Eds.), *Biomolecules from Natural Sources* (1a ed., pp. 458-469). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119769620.ch16>
- Pyzola, S. M., Dhakal, P., Coyne, M. S., Grove, J. H., Vandiviere, M. M., & Matocha, C. J. (2025). Transformation of organic matter under anoxic conditions in soils. *Science of The Total Environment*, 970, 178899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178899>
- Rochefort, L., Caille, O., & Van Nederveelde, L. (2024). Sequentially Pitching Lactic Acid Bacteria and Active Dry Yeasts for Sour Beer Production. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 82(2), 141-149. <https://doi.org/10.1080/03610470.2023.2215665>



Ana Belén Mejía Pérez

Email: belen.mejia@esPOCH.edu.ec

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1125-9128>

Grupo de Investigación para la Sostenibilidad de Cuencas Hidrográficas, Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Panamericana Sur km 1 ½, Riobamba, Chimborazo, Ecuador

Ana Belén Mejía Pérez es docente e investigadora ecuatoriana de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). Ingeniera en Biotecnología Ambiental y Máster Universitario en Biotecnología, ha desarrollado su trayectoria académica en la docencia universitaria, la investigación aplicada y la producción científica en las áreas de biotecnología, bioquímica, biodiversidad y genética, y sostenibilidad ambiental. Su trabajo se orienta especialmente a la microbiología, la biología molecular, la calidad ambiental y las aplicaciones de la biotecnología en sistemas naturales y productivos, con participación en proyectos de investigación, vinculación y publicaciones científicas en el campo de las ciencias biológicas y ambientales.



Ronny Fernando Robalino Silva

Email: ronnyrobalino1@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-2412-5506>

Independiente

Ronny Fernando Robalino es un autor cuya formación y trayectoria integran con naturalidad la rigurosidad científica y la reflexión filosófica. Ingeniero Químico por la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ha ampliado su horizonte académico con un Máster en Sistemas Integrados de Gestión y un Máster en Filosofía, construyendo una perspectiva que conjuga técnica y pensamiento crítico.

En el ámbito profesional, ha desarrollado experiencia en la industria química como Ingeniero de Procesos y Control de Calidad, especializándose en el diseño y optimización de procesos, así como en la gestión de la calidad bajo estándares normativos. Esta base, sumada a su formación analítica y su vocación reflexiva, se proyecta en una escritura que busca no solo explicar, sino también cuestionar y profundizar en la realidad que aborda.

ISBN: 978-9942-53-168-1



Compás
capacitación e investigación