GRUPO BLR

BIOTECNOLOGÍA Y BIOFÍSICA EN LA SEGURIDAD ALIMENTARIA:

NUEVAS HERRAMIENTAS PARA LA AGROINDUSTRIA



GEORGINA CARMILEMA - NORA MEJÍA - GABRIELA ARIAS

ISBN: 978-9907-802-04-7

2026

BIOTECNOLOGÍA Y BIOFÍSICA EN LA SEGURIDAD ALIMENTARIA: NUEVAS HERRAMIENTAS PARA LA AGROINDUSTRIA

AUTORES:

GEORGINA ESTHER CARMILEMA YUNGAN

NORA TAHIRÍ MEJÍA CABEZAS

MARÍA GABRIELA ARIAS GARNICA

GRUPO BLR

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR
Universidad Estatal de Bolívar
Riobamba – Ecuador
Correo: publicaciones@grupoblr.com
https://grupoblr.com/libros-investigo
REPOSITORIO



Carmilema, G., Mejía, N., Arias, M. (2026) Biotecnología y biofísica en la seguridad alimentaria: nuevas herramientas para la agroindustria. Grupo Editorial BLR.

© Georgina Esther Carmilema Yungan
Nora Tahirí Mejía Cabezas
María Gabriela Arias Garnica

ISBN: 978-9907-802-04-7

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

FILIACIONES DE LOS AUTORES

Georgina Esther Carmilema Yungan

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Correo Electrónico: georgina.carmilema@espoch.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3022-6775

Nora Tahirí Mejía Cabezas

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Correo Electrónico: nora.mejia@espoch.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0308-5412

María Gabriela Arias Garnica

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Correo Electrónico: mariag.arias@espoch.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2535-9776



PRÓLOGO

La seguridad alimentaria ha pasado de un control reactivo a una ingeniería de alta precisión. El presente escrito pone de relieve cómo la manipulación de la ecología microbiana mediante probióticos, prebióticos y postbióticos permite silenciar los patógenos mediante mecanismos moleculares como el *quorum quenching*, garantizando así la inocuidad conservando la integridad sensorial del alimento. Este cambio de paradigma resta importancia a los métodos tradicionales para dar paso a soluciones biotecnológicas que conservan la cadena de suministro activa. También profundiza en la Agroindustria 4.0 donde la fermentación sustituye el concepto tradicional por el de un proceso vinculado a Gemelos Digitales, sensores IoT e Inteligencia Artificial.

La arquitectura técnica, al monitorizar variables termodinámicas en tiempo real, asegura inocuidad por diseño, pero también acentúa la eficiencia operativa y la biodisponibilidad de nutrientes esenciales. Y, finalmente, se refiere la biofísica de las radiaciones como una forma de conservación no térmica de las amenazas biológicas a nivel atómico también capaz de alcanzar los estándares fitosanitarios internacionales y reducir el uso de conservantes químicos; constituyendo de ello una hoja de ruta básica para aquellos profesionales que quisieran liderar sistemas de alimentación sostenibles y biológicamente superiores.

ÍNDICE GENERAL

PRÓLOGO i
ÍNDICE GENERAL ii
INTRODUCCIÓN xii
Capítulo I 14
1. Probióticos, prebióticos y postbióticos: microorganismos que protegen y fortalecen la seguridad alimentaria 14
1.1 Fundamentos microbiológicos aplicados a la seguridad alimentaria 15
1.1.1 Homeostasis y termodinámica de la adaptación 15
1.1.2 Ecología de sistemas: Quorum sensing y biofilms 17
1.1.3 Dinámica del microbiota intrínseco vs. inoculada 19
1.1.4 Metagenómica y predictividad de riesgos 20
1.2 Microorganismos y su papel en la inocuidad de los alimentos 21
1.2.1 Patógenos emergentes y persistencia en la cadena de suministro 22
1.2.2 Formación de biofilms: El reservorio de la contaminación 22
1.2.3 Biopreservación: El antagonismo como herramienta de inocuidad 23
1.2.4 Neutralización de toxinas y antinutrientes 24
1.3 Definición, clasificación y características de los probióticos 25
1.3.1 Evolución del consenso y definición técnica 25
1.3.2 Clasificación taxonómica y la revolución genómica 25
1.3.3 Características biológicas y funcionales 26
1.3.4 Seguridad y calidad microbiológica 27
1.4 Mecanismos de acción de los probióticos en la protección alimentaria 28
1.4.1 Antagonismo directo y biocontrol 28

1.4.2 Exclusión competitiva y adhesión de nicho 29
1.4.3 Inmunomodulación y refuerzo de la barrera epitelial 30
1.4.4 Quorum quenching: Desactivación de la virulencia 31
1.5 Prebióticos: concepto, tipos y función tecnológica 31
1.5.1 Criterios de clasificación y resistencia química 32
1.5.2 Tipos de prebióticos y su origen 32
1.5.3 Función tecnológica en la seguridad y formulación alimentaria 33
1.5.4 Efectos metabólicos: La producción de AGCC 34
1.6 Postbióticos y metabolitos bioactivos de interés alimentario 34
1.6.1 Definición y marco conceptual 35
1.6.2 Composición y estructuras bioactivas 35
1.6.3 Ventajas tecnológicas en la seguridad alimentaria 36
1.6.4 Metabolitos bioactivos y biopreservación 37
1.7 Interacción probiótica–prebiótico–alimento 37
1.7.1 Sinergia metabólica y simbióticos de precisión 38
1.7.2 La matriz alimentaria como escudo biológico 38
1.7.3 Interacciones químicas y estabilidad 39
1.7.4 Impacto en la seguridad alimentaria 39
1.8 Aplicaciones en alimentos fermentados y funcionales 40
1.8.1 Matrices lácteas: El estándar de oro 40
1.8.2 Matrices vegetales y frutas: El desafío de la acidez 40
1.8.3 Productos cárnicos fermentados 41
1.8.4 Alimentos funcionales no fermentados 42
1.9 Control de microorganismos patógenos mediante cultivos benéficos.. 42
1.9.1 Antagonismo frente a patógenos críticos 43

1.9.2 El arsenal bioquímico de los cultivos protectores 43
1.9.3 Ventajas de la biopreservación en la industria 44
1.10 Viabilidad, estabilidad y calidad microbiológica 45
1.10.1 La "dosis terapéutica" y factores de degradación 45
1.10.2 Estrategias para mejorar la estabilidad 46
1.10.3 Control de calidad y métodos de cuantificación 47
1.10.4 Estabilidad de prebióticos y postbióticos 48
1.11 Evaluación de la inocuidad y riesgos microbiológicos 48
1.11.1 Estatus regulatorio: GRAS y QPS 48
1.11.2 El Riesgo de la resistencia antimicrobiana (RAM) 49
1.11.3 Producción de aminas biógenas y metabolitos tóxicos 50
1.11.4 Evaluación de la seguridad en poblaciones vulnerables 50
1.12 Regulación, normativa y etiquetado de alimentos funcionales 51
1.12.1 El marco del Codex Alimentarius 51
1.12.2 Divergencia regulatoria: EFSA vs. FDA 52
1.12.3 Requisitos de etiquetado y transparencia 53
1.12.4 Postbióticos: Un nuevo reto normativo 53
1.13 Tendencias e innovación en microbiología aplicada a alimentos.. 55
1.13.1 Probióticos de próxima generación (NGP) y farmabióticos 55
1.13.2 Edición genética CRISPR-Cas9 y seguridad dirigida 56
1.13.3 Impresión 3D y matrices alimentarias personalizadas 56
1.13.4 Inteligencia artificial (IA) y gemelos digitales microbiológicos 57
1.13.5 Nanotecnología: Nanopostbióticos 57
1.14 Métodos de evaluación experimental y validación científica 58
1.14.1 Protocolos de supervivencia gastrointestinal in vitro 58
1.14.2 Validación genómica y fenotípica de la seguridad 59

1.14.3 Challenge tests y microbiología predictiva 59
1.15 Desafíos tecnológicos y perspectivas futuras 60
1.15.1 La Barrera de la estabilidad termomecánica 60
1.15.2 Simbióticos de precisión y diseño computacional 61
1.15.3 Digitalización y trazabilidad (blockchain) 61
1.16 Discusión crítica: limitaciones, riesgos y controversias 63
Capítulo II 66
2 Bioprocesos y fermentación controlada: innovación para la inocuidad y calidad de los alimentos 66
2.1 Principios de los bioprocesos en la industria alimentaria 67
2.1.1 Arquitectura del bioproceso: Upstream y downstream 67
2.1.2 Estequiometría y eficiencia de conversión 68
2.1.3 Homeostasis y control del entorno 69
2.2 Bases bioquímicas y cinéticas de la fermentación 69
2.2.1 Bioquímica de la transformación y rutas metabólicas 69
2.2.2 Cinética del crecimiento microbiano: El modelo de Monod 70
2.2.3 Estequiometría y rendimientos de conversión ($\boldsymbol{Yp/s}$) 71
2.3 Fermentación tradicional y fermentación controlada 71
2.3.1 Fermentación tradicional o espontánea 71
2.3.2 Fermentación controlada e industrial 72
2.4 Microorganismos fermentativos de interés agroindustrial 73
2.4.1 Bacterias Ácido-Lácticas (BAL): Los biopreservantes primarios.. 73
2.4.2 Levaduras: Producción de etanol y perfiles aromáticos 74
2.4.3 Hongos filamentosos en la valorización de residuos 74
2.4.4 Cultivos adjuntos y de protección 75
2.5 Control de variables físicas y químicas del proceso 75

2.5.1 Temperatura: El regulador cinético 75
2.5.2 Control de pH y acidez titulable 76
2.5.3 Actividad de agua ($\boldsymbol{aw}$) y potencial redox (Eh) 77
2.5.4 Oxígeno disuelto ($\boldsymbol{dO2}$) y agitación 77
2.6 Diseño y operación de bioreactores alimentarios 77
2.6.1 Configuración y tipos de biorreactores 78
2.6.2 Modos de operación y estrategias de cultivo 79
2.6.3 Diseño higiénico y escalabilidad 80
2.7 Fermentación como estrategia de conservación de alimentos. 80
2.7.1 Mecanismos de acción en la conservación 81
2.7.2 Impacto en la estabilidad de matrices alimentarias 82
2.7.3 Exclusión competitiva y nicho ecológico 82
2.8 Mejora de la calidad nutricional mediante bioprocesos fermentativos 82
2.8.1 Fermentación como estrategia para la biodisponibilidad y biofortificación 83
2.8.2 Disminución de antinutrientes y producción de compuestos funcionales 84
2.9 Impacto de la fermentación en la calidad sensorial de los alimentos. 85
2.9.1 Efecto biofísico en texturas y sabores 86
2.9.2 Cultivos iniciadores de fermentación y aceptación del consumidor 86
2.10 Reducción de contaminantes y riesgos microbiológicos 87
2.10.1 Detección y control microbiano en los procedimientos fermentativos 88

2.10.2 Prevención de riesgos microbianos en los puntos críticos del proceso 89
2.11 Monitoreo y control de procesos fermentativos 91
2.11.1 Sensores IoT aplicados a sistemas fermentativos 92
2.11.2 Plataformas predictivas y control de procesos avanzado 94
2.12 Automatización y digitalización de bioprocesos 96
2.12.1 IA y automatización en bioprocesos 96
2.12.2 Plataformas digitales, gemelos digitales y control predictivo. 98
2.12.3 Integración de Internet de las Cosas (IoT), Sensores y Sistemas de control Automatizados 99
2.13 Evaluación de la inocuidad en sistemas fermentativos 100
2.13.1 Enfoque regulador de la inocuidad 100
2.13.2 Estudio microbiológico de la inocuidad 102
2.13.3 Control de los peligros químicos y metabolitos indeseables 102
2.13.4 Sistemas APPCC (HACCP) aplicados a fermentación 103
2.13.5 Transición de enfoques normativos y técnicos 104
2.14 Aplicaciones industriales en la agroindustria 104
2.14.1 Infraestructura industrial para bioprocesos fermentativos 105
2.14.2 Producción de proteínas alternativas a través de fermentación 107
2.14.3 Producción de lípidos y compuestos de funcionalidad 108
2.15 Innovación y perspectivas futuras en fermentación alimentaria 109
2.15.1 Fermentación de precisión y biología sintética 110
2.15.2 Inteligencia artificial, modelado predictivo y Biofísica del proceso 111
2.15.3 Innovación orientada a la sostenibilidad y economía circular 113
2.15.4 Perspectivas futuras y retos emergentes 114

Capítulo III 116
3 Radiaciones como herramientas biotecnológicas y biofísicas para garantizar alimentos seguros 116
3.1 Fundamentos biofísicos de las radiaciones 116
3.1.1 Naturaleza y energía de las radiaciones 116
3.1.2 Mecanismos de interacción 117
3.1.3 Los efectos físico-químicos en biomoléculas 118
3.2 Clasificación de las radiaciones aplicadas a alimentos 119
3.2.1 Radiaciones ionizantes 119
3.2.2 Radiaciones no ionizantes 120
3.3 Interacción de la radiación con los componentes del alimento… 121
3.3.1 Agua 121
3.3.2 Proteínas 122
3.3.3 Lípidos 122
3.3.4 Carbohidratos 123
3.4 Efectos de la radiación sobre microorganismos patógenos 123
3.4.1 Mecanismos biofísicos de la inactivación microbiana 123
3.4.2 Diferencial de sensibilidad de los microorganismos patógenos. 124
3.4.3 Implicaciones en salud pública 126
3.5 Irradiación de alimentos como método de conservación 126
3.5.1 Fundamentos tecnológicos y niveles de dosis 126
3.5.2 Aplicaciones prácticas en alimentos 127
3.5.3 Beneficios de la irradiación en comparación a las técnicas térmicas clásicas 128
3.6 Aplicación de radiaciones ionizantes en seguridad alimentaria 130
3.6.1 Disminución el riesgo microbiológico 131

3.6.2 Integración de tecnologías de barrera 131
3.6.3 Evaluación científica de la seguridad 132
3.6.4 Evaluación cuantitativa del riesgo microbiológico 133
3.6.5 Limitaciones y consideraciones técnicas 134
3.7 Aplicación de radiaciones no ionizantes en alimentos 135
3.7.1 Radiación ultravioleta (UV) en seguridad alimentaria 135
3.7.2 Luz pulsada de alta intensidad 136
3.7.3 Microondas y radiofrecuencia 137
3.7.4 Distintos efectos en la calidad nutricional y en la aceptabilidad sensorial 137
3.7.5 Aplicaciones prácticas en alimentos 138
3.7.6 La integración con las tecnologías de conservación 139
3.7.7 Limitaciones y pruebas futuras 140
3.8 Impacto de la radiación en la calidad nutricional 140
3.8.1 Principios físico-químicos que subyacen a la modificación nutricional 141
3.8.2 Efecto sobre los macronutrientes 142
3.8.3 Impacto sobre micronutrientes 143
3.8.4 Comparativa técnica de tratamientos térmicos 143
3.8.5 Efectos del estado físico de los alimentos 144
3.9 Impacto de la radiación en la calidad sensorial de los alimentos.. 145
3.9.1 Efecto sobre el color 145
3.9.2 Efectos sobre el aroma y el sabor 146
3.9.3 Efecto sobre la textura 147
3.9.4 Influencia del tipo de alimento 147
3.9.5 Comparación sensorial con métodos térmicos y calor 148

3.9.6 Tácticas tecnológicas para conservar la calidad sensorial 148
3.10 Aplicaciones en productos agrícolas y agroindustriales 149
3.10.1 Control fitosanitario y desinfestación de productos agrícolas… 149
3.10.2 Inhibición de la brotación y maduración 150
3.10.3 Aplicaciones en productos agroindustriales procesados 151
3.10.4 Reducir las pérdidas después de la cosecha 152
3.10.5 Integración en procesos agroindustriales 152
3.10.6 Consideraciones económicas y tecnológicas 153
3.11 Seguridad radiológica y evaluación de riesgos en la irradiación de alimentos 153
3.11.1 Los principios de seguridad radiológica aplicados a alimentos. 154
3.11.2 Evaluación toxicológica de los alimentos irradiados 154
3.11.3 La seguridad radiológica para el consumidor 155
3.11.4 Protección radiológica en el trabajo 156
3.11.5 Evaluación cuantitativa del riesgo 156
3.11.6 Comparación del riesgo con otros métodos de conservación 157
3.11.7 Gestión del riesgo y control regulador 158
3.12 Normativa y regulación internacional sobre irradiación 158
3.12.1 Marco regulador internacional 159
3.12.2 Norma General del Codex Alimentarius 159
3.12.3 Marco normativo y regulación de la irradiación de alimentos en Ecuador 160
3.13 Percepción del consumidor y comunicación del riesgo 164
3.13.1 Estrategias de comunicación del riesgo eficaces 165
CONCLUSIONES 166
GLOSARIO 168

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 173

INTRODUCCIÓN

Hay un cambio en dirección a una "seguridad alimentaria activa" debido a la piedra que la resistencia antimicrobiana y la demanda de productos apenas procesados suponen para la seguridad alimentaria global. Este libro describe cómo la manipulación de la ecología microbiana mediante el uso de probióticos, prebióticos y postbióticos es el primer escalón hacia la defensa de la agroindustria moderna. Y esto mediante mecanismos como la exclusión competitiva o el *quorum quenching*, convirtiendo estas herramientas biotecnológicas en formas de silenciar la virulencia de los patógenos en lugar de eliminarlos, lo que permite la producción de alimentos más seguros y funcionales que protegen tanto la salud intestinal del consumidor como la estabilidad biológica del alimento.

En el campo de la ingeniería, el libro trata la evolución de la fermentación desde el tradicional arte hasta el bioprocesamiento de precisión basado en la termodinámica y biología molecular. Especial énfasis se pone sobre la utilización de biorreactores de última generación y tecnologías de la Industria 4.0, como la Inteligencia Artificial, los sensores IoT y los "Gemelos Digitales", para normalizar la producción y anticipar el comportamiento de los microorganismos en tiempo real. Estos bioprocesos permiten, entre otras cuestiones, una mayor vida del producto y una mejor calidad nutricional al aumentar la biodisponibilidad de los minerales indispensables y, además, al producir metabolitos bioactivos que convierten las materias con las que se comienza en alimentos muy valorados. El libro también presenta la estrategia de uso

de radiaciones tanto ionizantes como no ionizantes como herramientas biofísicas en el control de procesos de garantía de la inocuidad sin recurrir a tratamientos térmicos agresivos.

Se presenta una explicación extensiva de cómo estas energías actúan a nivel atómico, produciendo daños irreversibles en el ADN de microorganismos patógenos y plagas. Este efecto permite el control fitosanitario y la reducción de las pérdidas postcosecha sin alterar la frescura ni el valor nutricional de los alimentos. La interacción de la radiación con tecnologías de barrera y con marcos regulatorios internacionales, como GRAS y QPS, ofrece en última instancia una visión integral de los desafíos alimentarios de este siglo, orientada al desarrollo de productos sostenibles, seguros y científicamente avalados.

Capítulo I

1. Probióticos, prebióticos y postbióticos: microorganismos que protegen y fortalecen la seguridad alimentaria

La seguridad alimentaria mundial se encuentra en un momento de inflexión crítico, causado por la creciente incidencia de la resistencia antimicrobiana, por el interés por los productos mínimamente procesados y por la necesidad de contar con sistemas de conservación sostenibles. Históricamente, la seguridad alimentaria se ha gestionado desde un enfoque de "esterilidad y control" basado exclusivamente en eliminar los agentes patógenos, pero el nuevo enfoque contemporáneo nos invita a la seguridad alimentaria activa, donde la manipulación de la ecología microbiana por medio de los agentes bióticos probióticos, prebióticos y postbióticos se convierte en la primera herramienta de defensa (Galanakis, 2020).

La tríada de estos componentes bióticos es una de las fronteras más prometedoras de la biotecnología de alimentos. A pesar de que los probióticos actúan como una fuerte barrera viva mediante mecanismos de exclusión competitiva y síntesis de péptidos antimicrobianos, los prebióticos actúan como moduladores selectivos que permiten la viabilidad y el éxito metabólico de estas bacterias buenas en matrices complejas. Por su parte, los postbióticos se erigen como una solución técnica disruptiva, en la medida que aportan la funcionalidad biológica sin encontrarse con las dificultades de supervivencias de los

microorganismos vivos, permitiendo su integración en una mayor diversidad de procesos industriales (Salminen y otros, 2021).

Este capítulo se desenvuelve analíticamente respecto de las bases microbiológicas de la protección de los alimentos, poniendo en relación de cómo esta interacción de los tres conocimientos permite reforzar no sólo la salud intestinal de los consumidores, sino también la estabilidad de los productos. Con el énfasis puesto en un capítulo técnico, basado en evidencias científicas de revistas indexadas, en este apartado se oferta desde las bases genómicas de la selección de cepas hasta las regularizaciones regulatorias internacionales un capítulo dedicado a dar cuenta del papel de los microorganismos en la oferta de una alimentación sostenible, funcional y resiliente frente los retos microbiológicos del siglo XXI.

1.1 Fundamentos microbiológicos aplicados a la seguridad alimentaria

El control microbiológico en la ciencia de los alimentos ha evolucionado de un enfoque empírico a uno basado en la termodinámica y la biología molecular. Para comprender cómo los microorganismos protegen la seguridad alimentaria, es imperativo analizar la respuesta celular ante las fluctuaciones del microentorno de la matriz.

1.1.1 Homeostasis y termodinámica de la adaptación

El análisis microbiológico de los alimentos ha pasado, de ser algo empírico, para la ciencia de los alimentos a una disciplina específica que se justifica desde la termodinámica y la biología molecular. Para entender cómo los microorganismos mantienen la seguridad alimentaria es necesario estudiar la percepción celular ante los cambios del microentorno de la matriz. Los microorganismos de los alimentos se manejan de acuerdo con el principio de homeostasis citoplasmática. Cuando un alimento es tratado o formulado (por ejemplo, cuando adicionamos sales o ácidos), existe un gradiente electroquímico. La seguridad alimentaria está supeditada a la capacidad de la tecnología de obstáculos para obligar a la célula microbiana a invertir su reserva de ATP en mantener el pH o el equilibrio osmótico, a expensas de la energía que se usaría para la replicación (Singh, 2018).

- **Respuesta al estrés osmótico:** La reducción de la actividad de agua (a_w) activa la acumulación de solutos compatibles como prolina, betaína o carnitina para evitar la plasmólisis; de tal forma que la capacidad de un probiótico para actuar como bioprotector dependerá de su capacidad de realizar el metabolismo de esta forma más eficientemente que los patógenos competidores.
- **Gradientes de pH y Potencial Motriz de Protones (PMF):** La inhibición de patógenos por la producción de ácidos orgánicos como consecuencia del crecimiento de probióticos no es solo cuestión de la acidez del medio. El ácido en estado protónico (no disociado) se difunde a través de la membrana celular; una vez dentro se disocia transportando protones que acidifican el

citoplasma y aniones que favorecen el incremento de la presión osmótica interna; lo que lleva a la muerte metabólica del patógeno (Galanakis, 2020).

1.1.2 Ecología de sistemas: Quorum sensing y biofilms

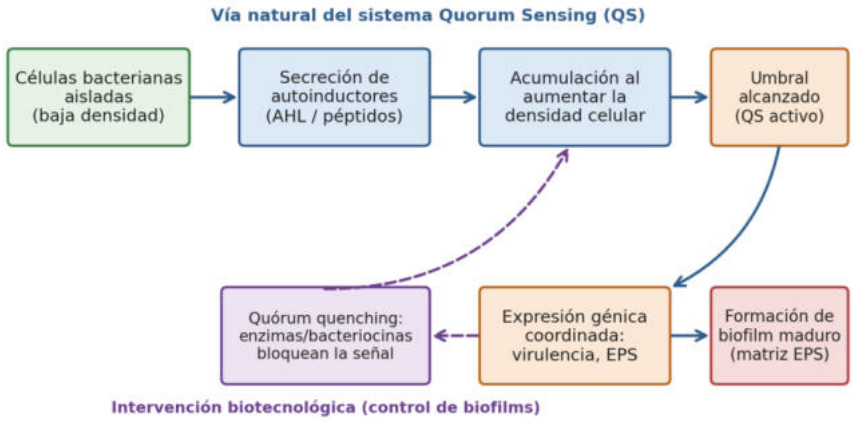
Una base microbiológica clave es que las bacterias no funcionan como individuos aislados, tal como lo hace una sola bacteria, sino como una población a la que dictan las reglas propias del Quorum Sensing (QS); el cual se muestra como un sistema de comunicación química dependiente de la densidad de la población que tiene lugar mediado por moléculas de señalización o moléculas que son señales como son las lactonas homoserina acilada (en Gram-negativas), o por medio de péptidos auto inductores (en Gram-positivas).

- **Interferencia biótica:** Los probióticos pueden producir/enunciar enzimas degradativas de moléculas de señal (quórum quenching), lo que bloquea la expresión de genes asociados a la formación de biofilms y a la síntesis de toxinas por los agentes patógenos.
- **Arquitectura de biofilms:** En la industria alimentaria los biofilms son reservorios de contaminación perdurable. Comprender la estructura de los EPS (sustancias poliméricas extracelulares) resulta clave para maximizar los esfuerzos de lograr que aquellos metabolitos de los postbióticos, logren traspasar estas barreras y neutralizar a las células sésiles (Silva y otros, 2018).

Este principio ha sido trasladado a la práctica industrial de la siguiente forma: este principio da lugar a un concreta del higienización y consiste en la utilización de formulaciones bacteriocinogénicas de nisina y de enzimas de quórum-quenching en los protocolos de limpieza y de higienización en línea (CIP: Clean-in-Place) de plantas lácteas y cárnicas para frenar la recolonización de las superficies críticas tras un tratamiento de limpieza convencional. Sin embargo, su eficacia depende, en buena medida, de la especie que forme el biofilm, del estado de madurez de la matriz de EPS y de la exposición previa a sanitizantes de la planta, por lo que su utilización debe ser validada en cada línea de producción antes de la posibilidad de cambiar los protocolos de higiene considerados estándar.

La Figura 1.1, muestra el mecanismo celular sintetizado en esta sección, incluyendo el punto de intervención de la biotecnología mediante quórum quenching.

Figura 1.1 Mecanismo celular del quorum sensing y formación de biofilms, con el punto de intervención biotecnológica mediante quórum quenching.



1.1.3 Dinámica del microbiota intrínseco vs. inoculada

La seguridad alimentaria es el resultado de la resiliencia del ecosistema, siendo el microbiota intrínseco del alimento (aquella que existe de forma natural en el mismo) el elemento que puede facilitar o dificultar la implantación de cultivos de probióticos.

1. **Sinergismo metabólico:** Ciertos microorganismos "preparan" el terreno a base de consumir el oxígeno residual, lo cual provoca una disminución del potencial redox (*Eh*), favoreciendo el crecimiento de especies anaerobias estrictas, como las bifidobacterias.
2. **Antagonismo de nicho:** La ocupación física de los lugares de adhesión en la superficie de las fibras alimentarias (prebióticos) por parte de estas bacterias beneficiosas bloquea mecánicamente la colonización del alimento por patógenos, tales como *E. coli* o *Listeria* (Zendeboodi y otros, 2020).

1.1.4 Metagenómica y predictividad de riesgos

Ahora ya contamos con herramientas bioinformáticas que nos permiten pasar del modelado determinista al modelado estocástico. Con la secuenciación masiva podemos llevar a cabo la identificación de genes de virulencia silenciosos o plásmidos de resistencia que, en la mayoría de los casos, no se expresarían cuando usamos medios tradicionales. Galanakis (2020) indica que el análisis del metaboloma (la totalidad de pequeñas moléculas generadas) permite la detección de la generación de aminas biógenas o micotoxinas in situ, en el momento previo a que los alimentos evidencien signos de alteración organoléptica.

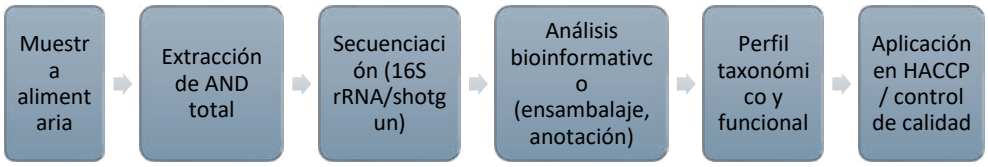
Entre las metodologías metagenómicas que pueden ser aplicadas en la seguridad alimentaria son destacables las de secuenciación de amplicones del gen 16S rRNA, con utilidad para la caracterización taxonómica rápida de comunidades microbianas, y aquellas como la metagenómica shotgun (secuenciación masiva de toda la muestra de ADN), que permite además inferir funciones metabólicas y genes de virulencia o de resistencia a antibióticos sin cultivo previo (Galanakis, 2020). A su vez, estas herramientas se ven complementadas con plataformas bioinformáticas de anotación taxonómica y funcional, cuya interpretación requiere personal especializado.

Sin embargo, la implementación rutinaria de la metagenómica en el control de calidad de la industria alimentaria presenta limitaciones importantes: la inversión en equipamiento así como en análisis bioinformáticos se mantiene cara frente a los clásicos métodos

microbiológicos; la falta de bases de datos de referencia adecuadas para representar cepas y matrices alimentarias regionales genera sesgo en la anotación taxonómica; y el hecho de que el análisis de detección de ADN, por su propia naturaleza, no distingue entre microorganismos viables e inviables, lo que puede exagerar el riesgo microbiológico real al no combinarse con técnicas de viabilidad, como el tratamiento con propidio monoazida. Además, se suma la falta de protocolos armonizados, así como de validación regulatoria que permitan utilizar los resultados obtenidos como evidencia formal en los sistemas de gestión de inocuidad (HACCP).

La Figura 1.2, resume de forma esquemática el flujo de trabajo metagenómico previamente descrito, de la toma de muestras a las aplicaciones prácticas en los sistemas de control de calidad.

Figura 1.2. Flujo de trabajo metagenómico aplicado a la seguridad alimentaria, desde la muestra hasta su aplicación en los sistemas de gestión de la inocuidad (HACCP).



1.2 Microorganismos y su papel en la inocuidad de los alimentos

La seguridad alimentaria no se puede considerar un estado; la inocuidad alimentaria es el desenvolvimiento de una competencia

ecológica continua. En este apartado vamos a describir cómo los microorganismos controlan la seguridad del producto por su persistencia en el tiempo a través de la persistencia estructural (biofilms) y por la capacidad de antagonismo biológico de los mismos.

1.2.1 Patógenos emergentes y persistencia en la cadena de suministro

La seguridad alimentaria está siendo puesta a prueba por aquellos microorganismos que han sabido desarrollar mecanismos aptos para sobrevivir en los ambientes industriales.

- **Bacterias psicrótrofas:** Los patógenos como *Listeria monocytogenes* o *Yersinia enterocolitica* son capaces de multiplicarse a temperaturas de conservación (temperatura de 4ºC). Su papel para la inocuidad es clave, ya que desafían el tradicional obstáculo térmico del almacenamiento en frío.
- **Resistencia a desinfectantes:** La exposición sub-letal a compuestos de amonio cuaternario y al cloro ha dado lugar a cepas con bombas de eflujo, expulsando los agentes antimicrobianos fuera de la célula y poniendo en peligro los protocolos de higiene estándar (Galanakis, 2020).

1.2.2 Formación de biofilms: El reservorio de la contaminación

El mayor obstáculo microbiológico a la inocuidad de los alimentos es la transición de las células planctónicas (libres) a las células sésiles (fijas en superficies). Los biofilms son comunidades complejas

embebidas en una matriz de sustancias poliméricas extracelulares (EPS).

- **Mecanismo de persistencia:** Los biofilms actúan protegiendo a los patógenos frente al estrés hídrico, los agentes químicos y las fuerzas de cizallamiento. Un biofilm de *Salmonella* o *Pseudomonas* puede ser hasta 1000 veces más resistente a los sanitizantes que las células individualizadas.
- **Transferencia horizontal de genes:** En el rededor de estas estructuras, la cercanía celular genera la transferencia de plásmidos que codifican para la resistencia a los antibióticos y la virulencia, lo cual hace de los biofilms "hotspots" de la evolución bacteriana (Silva y otros, 2018).

1.2.3 Biopreservación: El antagonismo como herramienta de inocuidad

Ante los riesgos de lo anterior, para lo cual deben entrar en juego los microorganismos beneficiosos, es decir, las culturas protectoras que utilizan microorganismos determinados (con predominancia de Bacterias Ácido-Lácticas, BAL) para abarcar la duración y la seguridad de la misma sin modificar las características sensoriales.

- **Producción de bacteriocinas:** Péptidos que se sintetizan en el ribosoma con actividad bactericida o bacteriostática.

Clase I (Lantibióticos): La nisina tiene un doble mecanismo de acción, por un lado, une el lípido II (precursor de pared celular) para inhibir la síntesis de peptidoglucano y, por otro, forma poros en la membrana.

Clase II (Péptidos no modificados): Como la pediocina, muy efectiva contra *Listeria* (Singh, 2018).

- **Competición por nutrientes y sitios de adhesión:** El principio de exclusión competitiva le dice que una población benéfica densa elevará los aminoácidos y cofactores (como el hierro mediante sideróforos) antes de que los patógenos logran establecerse.

1.2.4 Neutralización de toxinas y antinutrientes

El papel de los microorganismos en las estrategias de inocuidad también incluye la detoxificación de la matriz.

- **Degradación de micotoxinas:** Algunas cepas de *Lactobacillus* y *Bifidobacterium* pueden adsorber micotoxinas (como la Aflatoxina B1) a nivel de pared celular o, mediante actividad enzimática, degradarlas lo suficiente para reducir su biodisponibilidad o toxicidad con respecto al ser humano.
- **Reducción de aminas biógenas:** Microorganismos seleccionados muestran ser capaces de tener enzimas (amino oxidasas) que degradan la histamina y la tiramina, evitando episodios de intoxicación química en alimentos fermentados como quesos o embutidos (Zendeboodi y otros, 2020).

1.3 Definición, clasificación y características de los probióticos

El concepto de probióticos ha ido desde una idea empírica hasta el campo de la historia natural, hasta alcanzar un puntual nivel de rigurosidad molecular, donde la identificación y la caracterización de los microorganismos son la base que proporciona garantía, tanto a la debida eficacia terapéutica como la respetada seguridad de la cadena alimentaria.

1.3.1 Evolución del consenso y definición técnica

Siguiendo la declaración de consenso de la ISAPP (International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics), se pueden definir los probióticos como "microorganismos vivos que aportan un beneficio para la salud del huésped cuando son administrados en una cantidad adecuada (Hill y otros, 2014).

Un editor académico debe destacar que esta definición excluye a los cultivos iniciadores (*starters*) de fermentación que no disponen de evidencia clínica de beneficios para la salud y a los productos que no demuestran la viabilidad celular hasta el momento del instante de consumo. La "dosis eficaz" se ha fijado en una concentración mínima de 10^9 UFC/día (unidades formadoras de colonias) para asegurar que se produzca una colonización transitoria de efectividad (Zendeboodi y otros, 2020).

1.3.2 Clasificación taxonómica y la revolución genómica

Las clasificaciones tradicionales en base a perfiles de fermentación de azúcares y morfología (fenotipado) ha sido sustituida por la taxonomía polifásica.

- **Reclasificación del género *Lactobacillus*:** En el año 2020 uno de los cambios más perturbadores que ha habido en Microbiología de los Alimentos fue la separación del género Lactobacillus en 25 nuevos géneros (ej. *Lactobacillus casei* pasa a *Lacticaseibacillus casei*). La precisión taxonómica es importante para la PI, el etiquetado legal y la seguridad (Hill y otros, 2014).
- **Identificación a nivel de cepa:** La función de un probiótico es cepa-específica. Partiendo del mencionado caso de que dos cepas de *Bifidobacterium animalis* pueden compartir hasta el 99% de su genoma, se puede llegar a descubrir que solo una de estas cepas es capaz de contener los genes que le permiten llevar a cabo la producción de vitaminas o la adhesión específicamente a la mucosa. La validación exige recurrir a técnicas de secuenciación de genoma completo (WGS) para llevar a cabo el mapeo de los plásmidos y la determinación de la ausencia de los genes de resistencia antimicrobiana transferibles.

1.3.3 Características biológicas y funcionales

Una cepa debe demostrar una serie de características biofísicas y genéticas para poder ser considerada como candidata a probiótico y

poder sobrevivir y actuar en el ecosistema gastrointestinal. Esos rasgos son:

1. **Resistencia al tránsito gástrico:** Capacidad de tolerar un pH de 2.0 a 3.0 y de exposición a la pepsina. El tipo de mecanismo que favorece la resistencia a este tipo de condiciones serian mecanismos como el desarrollado por medio de la bomba de protones F1F0-ATPasa que se encarga del mantenimiento del pH intracelular en enterobacterias (Terpou y otros, 2019).
2. **Tolerancia a las sales biliares:** La bilis ejerce efectos de detergente que desestabilizan las membranas lipídicas. Las cepas probióticas eficaces sintetizan la enzima hidrolasa de sales biliares (BSH) que desconjuga las sales biliares, disminuyendo su toxicidad y, de forma colateral, influyendo en el metabolismo de colesterol del hospedador.
3. **Capacidad de adhesión:** A partir de estructuras como los *pili* o las proteínas de unión a la mucina (Mubs), el microorganismo debe ser capaz de unirse al epitelio intestinal para poder evitar ser arrastrado por el tránsito peristáltico llevando a cabo la modulación inmunológica (Zendeboodi y otros, 2020).

1.3.4 Seguridad y calidad microbiológica

La seguridad se entiende bajo conceptos como el de GRAS (Generally Recognized as Safe) en el caso de los EE.UU o de QPS (Qualified Presumption of Safety) en la Unión Europea. Las características de seguridad innegociables llegan a ser las de:

- **Ausencia de virulencia:** No producir toxinas y no tener actividad hemolítica.
- **Estabilidad genética:** No deben ser cepas que muten de manera rápida bajo el estrés del procesamiento industrial, lo que acabaría garantizando que se mantenga constante el beneficio entre lotes de producción (Terpou y otros, 2019).

1.4 Mecanismos de acción de los probióticos en la protección alimentaria

La efectividad de los probióticos con respecto a la seguridad alimentaria, no se trata de un fenómeno fortuito, sino que es consecuencia de los mecanismos moleculares altamente evolucionados que son responsables de tal efecto. Se distinguen los mecanismos de acción directos sobre los patógenos y los mecanismos de acción indirectos sobre el entorno del huésped.

1.4.1 Antagonismo directo y biocontrol

El mecanismo de acción más instantáneo es la producción de sustancias antimicrobianas que actúan in situ en la matriz alimentaria o frente al microbiota del tracto gastrointestinal.

- **Biosíntesis de bacteriocinas:** Estas toxinas proteicas presentan el efecto de ser "antibióticos de alta precisión". Las bacteriocinas de Clase I (lantibióticos, como la nisina) han desarrollado un mecanismo de acción dual: mediante su unión al lípido II, inhibiendo la síntesis de la pared celular y formando poros

estables en la membrana citoplasmática y produciendo la pérdida de iones potasio y ATP, acabando con la energía celular del patógeno (Silva y otros, 2018).

- **Producción de ácidos orgánicos y sistema redox:** El metabolismo fermentativo de los probióticos da lugar a ácido láctico, ácido acético y ácido propiónico. Estos compuestos no solo disminuyen el pH, sino que en su forma no disociada cruzan la membrana lipídica de las bacterias Gram-negativas (ej. *Salmonella*), acidificándose así el citoplasma. Asimismo, la producción de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) causa una reacción oxidante en microorganismos que de por sí carecen de enzimas como la catalasa (Bermudez Brito y otros, 2012).

1.4.2 Exclusión competitiva y adhesión de nicho

La protección alimentaria se basa en la ocupación física del espacio. Los probióticos compiten por los mismos sitios de unión que los patógenos a través de:

- **Proteínas de unión a superficie:** Los probióticos producen adhesinas (ej. S-layer proteins) que se enlazan a los receptores de manosa del epitelio intestinal. Al ocupar estos sitios, impiden mecánicamente a patógenos como *Escherichia coli* enteropatógena establecer infecciones.
- **Competencia nutricional:** Las unidades celulares de las cepas probióticas poseen una cinética de captación de nutrientes (como el hierro gracias a los sideróforos de alta afinidad) más rápida

que la de muchos patógenos alterantes, limitando el crecimiento de estos últimos en la matriz alimentaria (Zendeboodi y otros, 2020).

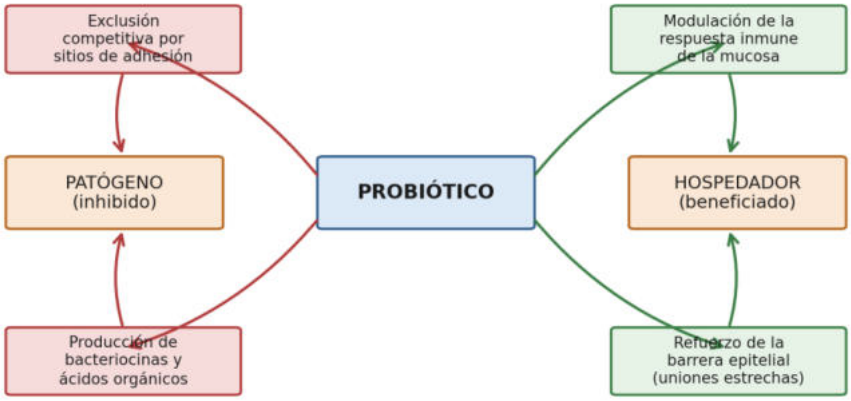
1.4.3 Inmunomodulación y refuerzo de la barrera epitelial

Cuando hablamos de seguridad para el consumidor, los probióticos ayudan a mejorar la resistencia contra las toxinas alimentarias:

- **Regulación de las tight junctions:** Los probióticos inducen la expresión de proteínas de unión estrecha (como ocludina y zonulina), disminuyendo la permeabilidad intestinal y evitando la translocación de las endotoxinas hacia el torrente sanguíneo.
- **Inducción de IgA secretora:** El contacto de los probióticos con las células M del intestino promueve la activación de los parches de Peyer, generando la secreción de inmunoglobulina A (IgA). La cual actúa como una auténtica trampa inmunitaria que neutraliza a los virus y las bacterias patógenos antes de que puedan interaccionar con el epitelio (Bermudez Brito y otros, 2012).

De forma resumida y al modo de esquema de los mecanismos expuestos en este apartado de los probióticos, la figura 1.3, muestra la relación simbiótica probiótico-hospedadorpatógeno.

Figura 1.3. Mecanismos de interacción simbiótica entre el probiótico, el hospedador y el patógeno (exclusión competitiva, producción de antimicrobianos, inmunomodulación y refuerzo de la barrera epitelial).



1.4.4 Quorum quenching: Desactivación de la virulencia

Una frontera novedosa de la seguridad alimentaria es la habilidad que tienen algunos probióticos para interferir en la comunicación bacteriana (Quorum Sensing). A través de la secreción de enzimas que digieren las moléculas señal (autoinductores), los probióticos pueden silenciar genes que activarían la producción de toxinas en patógenos como *Staphylococcus aureus*, desactivando su letalidad sin la necesidad de su eliminación, causando así menos riesgo de resistencia antimicrobiana (Silva y otros, 2018).

1.5 Prebióticos: concepto, tipos y función tecnológica

La definición de prebiótico ha ido desde ser "fibra dietética" a ser entendida como sustrato de fermentación selectiva que ordena la composición y el comportamiento del ecosistema microbiano. Para el consenso de la ISAPP, un prebiótico es "un sustrato que es utilizado

selectivamente por microorganismos del hospedador confiriendo un beneficio para la salud" (Gibson y otros, 2017).

1.5.1 Criterios de clasificación y resistencia química

Para que un compuesto se considere técnicamente como prebiótico, debe cumplir los tres requerimientos básicos:

1. **Resistencia a la digestión:** Debe evitar la hidrólisis enzimática a lo largo del tracto gastrointestinal alto (boca, estómago e intestino delgado) y llegar intacto al colon.
2. **Fermentabilidad selectiva:** Debe ser un sustrato específico para géneros benéficos, sobre todo *Bifidobacterium* y *Lactobacillus*, evitando su fermentación por parte patógena (proteolítica).
3. **Inducción de beneficios sistémicos:** Su fermentación debe dar lugar a la generación de metabolitos, como los ácidos grasos de cadena corta (AGCC), que expongan beneficios en el hospedador (Sanders y otros, 2019).

1.5.2 Tipos de prebióticos y su origen

Los prebióticos más definidos y aplicados en la industria son los carbohidratos no digeribles, y se definen según su grado de polimerización (DP):

- **Fructanos tipo Inulina (FOS e Inulina):** Se obtienen principalmente de la raíz de achicoria. Presentan enlaces β(2-1) que las enzimas humanas son incapaces de romper. Los FOS

(Fructooligosacáridos) tienen un DP bajo (<10), lo que provoca que sean muy solubles y muy rápidamente fermentables.

- **Galactooligosacáridos (GOS):** Producidos enzimáticamente a partir de la lactosa. Son el componente fundamental de la composición de los preparados de nutrición infantil, ya que mimetizan los oligosacáridos de la leche humana (HMO) y favorecen la colonización temprana de bífidobacterias.
- **Almidón Resistente (RS):** Es la fracción de almidón que escapa a la digestión. El RS tipo III (almidón retrogradado) es el más comercial y se caracteriza por su gran estabilidad térmica, a la vez que produce altos niveles de butirato, que es uno de los AGCC (ácidos grasos de cadena corta) más relevantes para la integridad del colonocito.
- **Compuestos emergentes:** se incluyen actualmente polifenoles y ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs) que, aunque no son carbohidratos, modulan de forma selectiva la microbiota tras mecanismos de exclusión metabólica (Gibson y otros, 2017).

1.5.3 Función tecnológica en la seguridad y formulación alimentaria

A la luz del ámbito de la ingeniería de alimentos, no sólo los prebióticos proporcionan propiedades funcionales, sino que también mejoran las propiedades fisicoquímicas de la matriz:

1. **Sustitutos de grasa y azúcar:** Como resultado de la habilidad para retener la humedad y formar geles, la inulina de larga cadena se usa como un *fat mimetic* en productos lactales y

cárnicos, pero que al mismo tiempo reduce el valor calórico sin muestreo de cremosidad (textura).

2. **Crioprotección de probióticos:** Los prebióticos en productos congelados y liofilizados funcionan como agentes osmoprotectores la membrana celular de los microorganismos vivos, impidiendo que se pierda la dosis mínima terapéutica ($10^7 UFC/g$) durante su vida útil (Terpou y otros, 2019).
3. **Control de la actividad de agua (a_w):** Este tipo de solutos, con una gran afinidad por el agua, contribuyen a disminuir la a_w de la matriz, actuando como un mecanismo de defensa frente al crecimiento de mohos y levaduras alterantes, y así, garantizando la seguridad microbiológica del producto.

1.5.4 Efectos metabólicos: La producción de AGCC

La fermentación de los prebióticos origina el acetato, el propionato y el butirato. Estas moléculas reducen el pH luminal del colon, de este modo impiden la supervivencia de los patógenos sensibles al ácido como *Clostridium difficile* por un mecanismo mecánico. Al tiempo, el propionato se transporta al hígado de forma que implica regular la gluconeogénesis, poniendo de manifiesto que el beneficio del prebiótico no solo atañe a la seguridad digestiva, sino que va más allá, impactando en la salud metabólica en su conjunto (Sanders y otros, 2019).

1.6 Postbióticos y metabolitos bioactivos de interés alimentario

El paradigma de que solo los microorganismos vivos pueden ejercer un beneficio para la salud ha sido sobrepasado por el concepto de postbióticos. Esta clase de biotecnología proporciona una mejor estabilidad y un perfil de seguridad más predecible, específicamente en casos de poblaciones vulnerables o de matrices alimentarias de larga vida (Salminen y otros, 2021).

1.6.1 Definición y marco conceptual

Siguiendo el consenso de la ISAPP, un post-biótico se define como "una preparación que resulta de microorganismos inanimados y/o sus componentes y que confiere un beneficio a la salud del hospedador" (Salminen y otros, 2021). Es importante matizar que un postbiótico no es un mero residuo del metabolismo, sino que debe tener células microbianas que se encuentren inactivadas o bien fragmentos celulares (paredes celulares o membranas) que mantengan su capacidad de interacción biológica.

1.6.2 Composición y estructuras bioactivas

Los post-bióticos se constituyen en una mezcla de moléculas y estructuras que actúan en combinación:

- **Componentes estructurales:** Ácidos teicoicos, peptidoglicanos, exopolisacáridos (EPS).Estos actúan como patrones moleculares asociados a los microbios (MAMPs), que son reconocidos por los receptores de reconocimiento de patrones (PRRs) en el

intestino, generando así una modulada respuesta inmune sin la posibilidad de infección (Zendeboodi y otros, 2020).

- **Metabolitos secretados:** Ácidos grasos de cadena corta (AGCC), antimicrobianos péptidos (bacteriocinas), e incluso las enzimas a y las vitaminas sintetizadas como resultado del proceso de fermentación de los inactivados.
- **Lisados celulares:** Contenido citoplasmático, liberado mediante la ruptura celular, que tiene una elevada densidad de enzimas con funcionalidad y sus cofactores.

1.6.3 Ventajas tecnológicas en la seguridad alimentaria

Desde su óptica desde el tamaña "cuello de botella" de los probióticos convencionales:

1. **Estabilidad térmica:** Al estar compuestos como un elemento con células ya en inanimadas, pueden exponerse a procesos de pasteurización, UHT o extrusión sin perder funcionalidad, permitiendo ser incorporados a productos como panificados, bebidas de larga duración, alimentos enlatados.
2. **Vida útil prolongada:** No presentan el problema de la pérdida progresiva de viabilidad (muerte celular) durante el período de almacenamiento, garantizando que la dosis funcional declarada en el etiquetado sea la misma hasta la fecha de caducidad.
3. **Seguridad microbiológica intrínseca:** Eliminan el riesgo de translocación bacteriana (paso de bacterias vivas al torrente sanguíneo) y de transferencia horizontal de genes de resistencia a

antibióticos, siendo una ventaja fundamental en el análisis de riesgos microbiológicos (Salminen y otros, 2021).

1.6.4 Metabolitos bioactivos y biopreservación

Los metabolitos de fermentación postbiótica tienen aplicaciones directas en inocuidad:

- **Ácidos orgánicos de espectro amplio:** El ácido fenil-láctico y el ácido hidroxifenil-láctico, biosintetizados por determinadas BAL, poseen una gran actividad antifúngica, siendo capaces de inhibir el crecimiento de mohos alterantes como *Aspergillus* y *Penicillium* en la industria de la panadería (Singh, 2018).
- **Bio-surfactantes:** Algunos postbióticos se comportan como bio-surfactantes naturales, los cuales tienen la capacidad de desestabilizar la adhesión de los patógenos a las superficies de contacto alimentario, contribuyendo en este sentido a que las líneas de producción no constituyan un lugar propicio para la formación de biofilms persistentes (Silva y otros, 2018).

1.7 Interacción probiótica–prebiótico–alimento

La interacción entre estos tres elementos establece la eficacia real de un producto funcional. La interacción entre probióticos y prebióticos se conoce como simbiótico, un conjunto de probióticos y prebióticos que apoyan al hospedador mediante la mejora de la supervivencia y la implantación de microorganismos vivos en el tracto gastrointestinal (Sanders y otros, 2019).

1.7.1 Sinergia metabólica y simbióticos de precisión

Hay dos tipos de simbióticos en función del diseño o esquema de elaboración.

- **Simbiótico complementario:** Las partes actuando de forma independiente; el probiótico aporta un beneficio y el prebiótico modula el microbiota endógeno (general).
- **Simbiótico sinérgico:** El prebiótico es el sustrato preferido de la cepa probiótica incluida. Por ejemplo, la combinación de *Bifidobacterium lactis* con galactooligosacáridos (GOS) que solo la mencionada cepa puede hidrolizar eficientemente, confiriéndole ventaja competitiva sobre los patógenos del colon (Gibson y otros, 2017).

1.7.2 La matriz alimentaria como escudo biológico

El alimento no es solamente un vehículo, sino un sistema de entrega que protegerá al probiótico: frente al estrés ambiental y digestivo. La base de esta interacción es por la:

1. **Protección frente al pH gástrico:** las matrices ricas en proteínas (yogur o queso) y grasas (chocolate) funcionan como tampones; las proteínas secuestran protones (H^+) lo cual aumenta temporalmente el micro-pH que rodea la célula bacteriana y permite que este cruce el estómago con una viabilidad hasta un 40% superior que en la solución acuosa (Zendeboodi y otros, 2020).

2. **Efecto de la estructura (microencapsulación natural):** Los alimentos a partir de estructuras poliméricas o porosas (cereales integrales, frutas con alto contenido en pectina) proporcionan espacios físicos donde las bacterias quedarán atrapadas y blindadas de las sales biliares.

1.7.3 Interacciones químicas y estabilidad

Los prebióticos dentro de la matriz alimentaria modificarán la actividad de agua *(a_w)* y, por tanto, la estabilidad oxidativa:

- **Retención de humedad:** Los prebióticos como la inulina forman puentes de hidrógeno con el agua, modificando la movilidad molecular y limitando la deshidratación letal de la membrana del probiótico en el almacenamiento.
- **Capacidad antioxidante:** Algunos prebióticos emergentes como los polifenoles pueden reducir el potencial redox (*Eh*) del alimento, ofreciendo protección hacía los probióticos anaerobios del daño causado por especies reactivas de oxígeno (Sanders y otros, 2019).

1.7.4 Impacto en la seguridad alimentaria

simbiótica se pone de manifiesto por la seguridad aumentada por fermentación dirigida. El hecho de que un probiótico tenga acceso a un prebiótico específico por parte del alimento, acelera la producción de ácidos orgánicos y de bacteriocinas, disminuyendo, así, el "tiempo de latencia" de la bioprotección e impidiendo que cualquier patógeno

residual del alimento, pueda comenzar a crecer exponencialmente (Terpou y otros, 2019).

1.8 Aplicaciones en alimentos fermentados y funcionales

La aplicación de probióticos y prebióticos en la industria de alimentos ha escapado del área de los productos lácteos "típicos" para invadir matrices cárnicas, vegetales o bebidas fermentadas. Ello lleva a que no sean simplemente un sustrato sino verdaderos sistemas de estabilización microbiológica complejos (Marco y otros, 2017).

1.8.1 Matrices lácteas: El estándar de oro

Los productos lácteos fermentados (yogur, kéfir, quesos funcionales) son los principales medios de vehículos debido a su compatibilidad fisicoquímica con las Bacterias Ácido-Lácticas (BAL).

- **Dinámica de fermentación:** Emplear cultivos probióticos acompañantes (como *Lacticaseibacillus rhamnosus*) junto a cultivos iniciadores (*Streptococcus thermophilus*) propicia una adecuada acidez y por ende inhibe patógenos tales como *Staphylococcus aureus*.
- **Bio-enriquecimiento:** Durante la fermentación láctica, los probióticos hidrolizan las proteínas de leche liberando péptidos bioactivos antihipertensivos y antioxidantes, lo que enriquece el valor nutritivo del alimento (Terpou y otros, 2019).

1.8.2 Matrices vegetales y frutas: El desafío de la acidez

La demanda de productos veganos ha inducido el desarrollo de jugos y alimentos vegetales fermentados.

- **Adaptación al estrés:** Matrices como el zumo de naranja o granada presentan un pH bastante bajo (3.0-3.5) por lo que deben emplearse cepas resistentes (ej. *Lactiplantibacillus plantarum*) que utilicen mecanismos de descarboxilación de aminoácidos para poder sobrevivir.
- **Degradación de anti nutrientes:** En cereales y legumbres fermentados, los probióticos producen la enzima fitasa, que degrada los fitatos (compuestos que dificultan la absorción de minerales como el hierro y el zinc) y, por tanto, incrementan la biodisponibilidad mineral del alimento resultante (Marco y otros, 2017).

1.8.3 Productos cárnicos fermentados

En embutidos madurados (por ejemplo: salami) se utilizan los probióticos como cultivos protectores.

- **Bioprotección contra *listeria*:** La inoculación de una cepa productora de bacteriocinas (*Pediococcus acidilactici*) es un recurso fundamental de seguridad alimentaria para controlar la contaminación por *Listeria monocytogenes* en largos procesos de maduración a temperatura ambiente.
- **Reducción de nitritos:** Hay una nueva idea innovadora que introduce probióticos que reducen el uso de nitritos en lugar de contar exclusivamente con el control del potencial redox y la

producción natural de compuestos antimicrobianos (Silva y otros, 2018).

1.8.4 Alimentos funcionales no fermentados

Los probióticos y prebióticos también se añaden a productos alimenticios de consumo habitual que no han sido sometidos a un proceso de fermentación, como las barras de cereales, las fórmulas infantiles o los chocolates.

- **Microencapsulación:** En este tipo de productos se aplican técnicas de secado por aspersión (*spray drying*) que recubrían a los probióticos mediante la aplicación de polímeros prebióticos, protegiéndolos de la oxidación y de la inactividad, a la vez que garantizaban su viabilidad al consumidor.
- **Diseño de Etiquetas Limpias (*Clean Label*):** La inclusión de prebióticos como la inulina en este tipo de productos no solo mejora la textura y el cuerpo de los alimentos de consumo habitual, sino que lo conseguía sin la incorporación de aditivos sintéticos, respondiendo a las exigencias que plantea el actual mercado (Galanakis, 2020).

1.9 Control de microorganismos patógenos mediante cultivos benéficos

El uso de cultivos benéficos para controlar patógenos se denomina biopreservación. La biopreservación, en contraste a los conservantes químicos, recurre a la competencia ecológica y al arsenal bioquímico

de los microorganismos de Grado Alimenticio (en esencia los BAL) para eliminar o inhibir el crecimiento de las bacterias peligrosas, sin que haya por su parte pérdida de las características sensoriales del alimento (Silva y otros, 2018).

1.9.1 Antagonismo frente a patógenos críticos

El control biológico se orienta específicamente contra microorganismos que son el origen de las enfermedades más graves transmitidas por alimentos (ETA):

- ***Listeria monocytogenes:*** Por su psicrotrofismo y por la capacidad de formar biofilms duraderos, es el patógeno objetivo de los cultivos protectores en carnes listas para el consumo (*Ready-to-Eat*). La utilización de *Lacticaseibacillus curvatus* ha mostrado una inhibición total de *Listeria* mediante la producción in situ de bacteriocinas de Clase II (Silva y otros, 2018).
- ***Clostridium botulinum:*** En productos envasados al vacío, la rápida acidificación inducida por probióticos de cultivo iniciador es el obstáculo que se interpondrá entre la germinación de esporas y la posterior producción de la toxina botulínica.
- ***Staphylococcus aureus:*** La competencia por nutrientes y la baja reacción de reducción (Eh) impiden que la población de este patógeno alcance la densidad crítica para la producción de enterotoxinas termoestables.

1.9.2 El arsenal bioquímico de los cultivos protectores

Los cultivos benéficos se valen de un arsenal de ataque múltiple:

1. **Bacteriocinas de amplio y corto espectro:** Son péptidos antimicrobianos que actúan generando poros en la membrana citoplasmática del patógeno. La Nisina es su representante más exitoso y se muestra eficaz frente a esporas de bacterias Gram-positivas. Los recientes avances sugieren que se podrá producir mediante cepas capaces de producir múltiples bacteriocinas a la vez con tal de impedir la aparición de resistencia bacteriana (Singh, 2018).
2. **Sistemas de Interferencia de Señal (Quorum Quenching):** Algunos cultivos útiles secretan enzimas que atacan los autoinductores patogénicos. Esto no sería suficiente para matar a la bacteria, pero sí "apagará" los genes de virulencia y evitará la producción de toxinas y su disposición para formar biopelículas (Bermudez Brito y otros, 2012).
3. **Producción de reuterina:** Producida por *Limosilactobacillus reuteri* a partir de glicerol, es un producto de amplio espectro capaz de inhibir tanto bacterias Gram-negativas (p. ej.: *E. coli* o *Salmonella*) como hongos y levaduras; así se otorga una seguridad transversal en la matriz alimentaria.

1.9.3 Ventajas de la biopreservación en la industria

La integración de estos cultivos benéficos brinda ventajas que no son alcanzables mediante los métodos físicos o químicos:

- **Acción in situ:** El cultivo protector puede adaptarse a los cambios de temperatura y humedad de los alimentos para producir antimicrobianos en el instante preciso en que las condiciones permiten la existencia del patógeno.
- **Etiquetado limpio (*Clean Label*):** Permite suprimir o reducir el uso de nitritos, sorbatos o benzoatos, lo que es un requerimiento del consumidor en su búsqueda de productos "naturales", pero seguros.
- **Extensión de la vida útil:** Al controlar el microbiota alterante (como las bacterias ácido-lácticas de alteración que provocan viscosidad o mal olor), los cultivos benéficos pueden llegar a duplicar el tiempo de vida comercial de productos cárnicos y lácteos frescos (Galanakis, 2020).

1.10 Viabilidad, estabilidad y calidad microbiológica

Para que un alimento sea considerado funcional y seguro no basta solamente con la positividad inicial de los microorganismos benéficos, hay que dar unas condiciones que garanticen la viabilidad (estado vivo y metabólicamente activo) durante el total de la vida útil. La viabilidad es el parámetro que conecta la tecnología de alimentos con la eficacia clínica (Zendeboodi y otros, 2020).

1.10.1 La "dosis terapéutica" y factores de degradación

El consenso mundial establece que un alimento probiótico debe conservar una concentración mínima de entre 10^6y 10^7 UFC/g en el momento de ser consumido. El mantenimiento de este nivel

poblacional se ve entorpecido por diversos factores extrínsecos e intrínsecos:

- **Estrés oxidativo:** La mayoría de los probióticos, y en concreto las bifidobacterias, son anaerobios estrictos, por lo que el oxígeno disuelto en la matriz o el proceso de difusión del oxígeno del envase generan especies reactivas de oxígeno (ROS) que dañan la membrana de los lípidos y el ADN bacteriano.
- **Post-acidificación:** Tras el almacenamiento refrigerado y la metabolización residual de las propias bacterias se producen ácidos orgánicos. Mantener el pH por debajo de 4.0 hace que la viabilidad de muchas cepas se reduzca de forma exponencial debido al colapso de su homeostasis interna (Terpou y otros, 2019).
- **Presión osmótica y a_w:** En productos alimenticios con humedad intermedia, la baja actividad de agua puede inducir la plasmólisis de las células en el caso de no incluir agentes protectores.

1.10.2 Estrategias para mejorar la estabilidad

La industria aplica diferentes estrategias de ingeniería para tratar de aumentar el shelf-life de estos microorganismos:

1. **Microencapsulación:** Consiste en incluir las células en matrices poliméricas (alginato, quitosano, proteínas de suero), y esta barrera física evitaría que los microorganismos sean expuestos a la acidez gástrica o al oxígeno. La microencapsulación mediante secado por aspersión (spray drying) o liofilización permite la

transformación de los cultivos en líquidos a polvo estable para su posterior mezcla con matrices secas (Zendeboodi y otros, 2020).

2. **Selección de envases activos:** La utilización de materiales de alta barrera al oxígeno, así como la incorporación de "secuestradores de oxígeno" en el empaque, resulta importante para mantener la viabilidad de cepas sensibles durante la manipulación y distribución (Galanakis, 2020).
3. **Adaptación previa al estrés:** La exposición de las células a niveles subletales de estrés (calor o ácido) durante su cultivo industrial induce la expresión de las proteínas de choque térmico y de las chaperonas, aumentando su resistencia a los procesos posteriores de procesamiento y almacenamiento.

1.10.3 Control de calidad y métodos de cuantificación

La validación de la calidad microbiológica debe ser estricta y estandarizada:

- **Recuento en Placa (Plate Count):** Es el método clásico (UFC), pero tiene una serie de limitaciones, dado que no detecta las células que se pueden encontrar en estados "viables, pero no cultivables" (VBNC), que aún pueden tener efectos biológicos.
- **Citometría de flujo:** Es una técnica más reciente que puede distinguir entre células vivas, dañadas o muertas en unos pocos minutos, exponiendo una imagen real del estado fisiológico de la población del alimento.

- **PCR Cuantitativa (qPCR):** También activa la identificación específica de la cepa y su cuantificación, asegurando la correspondencia entre el recuento total, el probiótico específico y no un contaminante (Terpou y otros, 2019).

1.10.4 Estabilidad de prebióticos y postbióticos

A diferencia de los microorganismos vivos, los prebióticos y postbióticos son mucho más estables. Los prebióticos, como la inulina, son prácticamente resistentes a la mayoría de los tratamientos térmicos, aunque pueden sufrir algún tipo de hidrólisis parcial en condiciones de pH y temperatura altísimos. Los postbióticos, como ya son células inactivadas, no necesitan cadena de frío y su bioactividad estructural, por ejemplo, pueden mantenerse durante años lo que simplifica mucho esta tarea de control de calidad industrial (Salminen y otros, 2021).

1.11 Evaluación de la inocuidad y riesgos microbiológicos

La evaluación de la inocuidad de los probióticos no debe tener en cuenta la historia de uso (en entornos humanos) o la presunción de seguridad, requerirá la validación de la acción de la alternativa frente a un protocolo científico estandarizado. La evaluación de riesgos hace hincapié en erradicar tres peligros: la patogenicidad intrínseca, la transferencia de resistencia a antibióticos y la formación de metabolitos tóxicos (Burdock & Carabin, 2004).

1.11.1 Estatus regulatorio: GRAS y QPS

El marco de referencia global para la evaluación de la inocuidad consiste en:

- **GRAS (Generally Recognized as Safe - EE. UU):** Implica la FDA que se basa en la evidencia científica de la seguridad bajo las condiciones de uso que se han establecido como intencionadas.
- **QPS (Qualified Presumption of Safety - UE):** Se encuentra cumplido a través de la EFSA. Este sistema realiza la evaluación de una unidad taxonómica y si una especie se encuentra en la lista QPS solo se deben evaluar rasgos específicos de la cepa como la ausencia de resistencia a antibióticos (Zendeboodi y otros, 2020).

1.11.2 El Riesgo de la resistencia antimicrobiana (RAM)

Un riesgo de la seguridad alimentaria es que los probióticos puedan funcionar como un reservorio de los genes de resistencia para su potencial transferencia hacia los patógenos intestinales.

- **Resistencia intrínseca vs. adquirida:** La resistencia intrínseca (donde el gen es propio de la especie y no puede ser transferido) no implica un riesgo potencial en la seguridad alimentaria, en cambio, la resistencia adquirida por la acción de plásmidos o transposones sí es un riesgo inaceptable viéndose la necesidad de efectuar las cepas mediante Secuenciación de Genoma Completo (WGS) para cerciorarse de la no presencia de elementos genéticos móviles que codifiquen un fenotipo de resistencia a los

antibióticos de interés clínico, tales como la vancomicina o la eritromicina (Sanders y otros, 2019).

1.11.3 Producción de aminas biógenas y metabolitos tóxicos

El metabolismo de ciertos microorganismos, incluidas las BAL (bacterias ácido-lácticas) a las que se atribuyen ciertas enzimas descarboxilasas, puede ser responsable de la producción de aminas biógenas (histaminas, tiraminas, putrescinas).

- **Toxicidad química:** La presencia de altas concentraciones de histamina en un alimento puede ser responsable de reacciones pseudoalérgicas graves. Por tanto, las cepas probióticas y los cultivos protectores han de ser tamizadas fenotípica y genotípicamente para garantizar que no manifiestan genes como la *hdc* (histidina descarboxilasa) y *tdc* (tirosina descarboxilasa) ((Burdock & Carabin, 2004).
- **Actividad hemolítica y desconjugación de bilis:** Se han de realizar ensayos *in vitro* para la confirmación de que no se detecta actividad hemolítica (ruptura de glóbulos rojos) relacionada con una desconjugación excesiva de sales biliares que pueda interferir con la absorción de grasas en el hospedador.

1.11.4 Evaluación de la seguridad en poblaciones vulnerables

Los probióticos son seguros para la población en general, si bien no está exenta la posibilidad de que personas inmunocomprometidas puedan experimentar, en un mínimo de casos, translocación bacteriana

(paso de la bacteria del lumen intestinal a la circulación sanguínea), generando en ese caso una bacteriemia. Precisamente en este aspecto los postbióticos gozan de una posición privilegiada, ya que al ser microorganismos inanimados los riesgos de infección generan una garantía de seguridad del microorganismo al mismo tiempo que son mantenidos los beneficios inmunomoduladores (Salminen y otros, 2021).

1.12 Regulación, normativa y etiquetado de alimentos funcionales

La regulación de los alimentos funcionales con probióticos y/o prebióticos y/o postbióticos es diferente según el lugar, lo cual supone un obstáculo para la industria mundial. Las normativas tienen un doble objetivo: asegurar la inocuidad del producto y controlar que la información ofrecida al consumidor no sea engañosa a la vez que está respaldada por evidencias (Galanakis, 2020).

1.12.1 El marco del Codex Alimentarius

El marco del Codex Alimentarius, a nivel internacional, da las directrices generales, aunque carece de carácter vinculante ni por sí mismo. La guía del Codex Alimentarius expone que cualquier microorganismo adicionado como "probiótico" ha de estar caracterizado genéticamente (género, especie y cepa) y que la dosis funcional ha de estar presente hasta la fecha de caducidad. El Codex influye de forma directa en la normativa de muchos Estados en desarrollo y, a su vez, esta puede servir para resolver litigios en el

marco de la OMC (Organización Mundial del Comercio; World Trade Organization).

1.12.2 Divergencia regulatoria: EFSA vs. FDA

La disparidad entre la Unión Europea y los Estados Unidos es de las cuestiones más difíciles que existen en la legislación de alimentos funcionales:

- **Unión Europea (EFSA):** La EFSA aplica criterios extremadamente exigentes (Reglamento (CE) 1924/2006). Hasta la actualidad, el término "probiótico" se considera una declaración de salud prohibida en la etiqueta de la mayor parte de los países de la UE (con excepciones recientes como son los casos de España e Italia), en el sentido en que dicha denominación conlleva un beneficio médico que es necesario documentar mediante evidencias clínicas indiscutibles.
- **Estados Unidos (FDA):** La legislación es más laxa y se presenta diversificada. Los probióticos pueden utilizarse con las siguientes denominaciones:

1. **Ingredientes alimentarios (GRAS):** En la que la principal atención se centra en la seguridad.
2. **Suplementos dietéticos:** Que requieren una "notificación de estructura/función" previa a su introducción en el mercado, pero no una aprobación previa.

3. **Declaraciones de salud:** Que requieren "Acuerdo Científico Significativo" (SSA), un nivel de pruebas muy alto (Sanders y otros, 2019).

1.12.3 Requisitos de etiquetado y transparencia

Para que un alimento funcional cumpla con la calidad microbiológica y legal que se le requiere, el etiquetado de este tipo de alimento debe incluir obligatoriamente:

1. **Nomenclatura científica precisa:** Indicar *Lactobacillus* no se considera suficiente; es muy importante especificar la cepa de Lactobacillus (ej. *Lacticaseibacillus rhamnosus GG*). Esto es crucial, dado que los efectos de un probiótico son, por supuesto, específicos por cepa.
2. **Recuento de células viables:** Debe estar indicado en UFC/porción o gramos. La declaración de la cantidad de células al momento de fabricar el producto representa un fraude alimentario si la cantidad de células disminuye en el momento que el consumidor lo compra (Zendeboodi y otros, 2020).
3. **Instrucciones de almacenamiento:** La viabilidad también depende de la temperatura y la humedad, así que el etiquetado tiene que advertir si el producto tiene que ser refrigerado para su actividad funcional.

1.12.4 Postbióticos: Un nuevo reto normativo

Dado que la noción de postbiótico es relativamente reciente (consenso de 2021), una gran parte de las legislaciones no dispone aún de una categoría de postbióticos. Actualmente, suelen estar regulados como "Nuevos Alimentos" (Novel Foods) en la UE lo que implica la aprobación a través de un proceso exhaustivo donde se requiere mostrar que el microorganismo inactivado no tiene riesgo alguno (Salminen y otros, 2021).

Esta indefinición regulatoria no es simultáneamente extensiva: la Unión Europea tiende a ejercer la ruta de Novel Food, otras jurisdicciones EE UU, o varios países de América Latina, Ecuador incluido no disponen de una categoría normativa específica para los postbióticos, de modo que su comercialización dependerá del caso de que se ajuste a normativa de aditivos, de suplementos o de alimentos funcionales. Esta diversidad normativa le impide promover la armonización de exigencias sobre inocuidad y las alegaciones de salud que se dejan poner en marcha entre los países, lo que se convierte en una barrera real para poder exportar productos formulados con postbióticos.

Junto a esta indefinición normativa existe un riesgo comercial y ético: la falta de una norma consolidada hace que se puedan etiquetar productos como "postbiótico" no ya sin seguir estrictamente la definición de consenso de la ISAPP, sino incluso sin un respaldo clínico inseparable de la cepa o del proceso de inactivación usado. En esta línea es muy reciente la descripción informal de esta práctica de etiquetado como "el postbiotic-washing" en la literatura general. Esta

práctica puede poner en riesgo la confianza del consumidor y del sector científico en la categoría completa de "postbióticos". Por ello, diversos autores (Salminen et al., 2021) hacen hincapié en que la evidencia de eficacia y de seguridad debe generarse cepa por cepa y de proceso en proceso, y no puede extrapolarse de un conjunto de datos obtenidos por microorganismos vivos de la misma especie.

1.13 Tendencias e innovación en microbiología aplicada a alimentos

La microbiología de los alimentos ha pasado a ser una ciencia de reacción para convertirse en una ciencia de diseño predictivo. Las innovaciones actuales no sólo pretenden conseguir la preservación del alimento, sino también su personalización del impacto biológico y la optimización de la liberación de compuestos bio-activos a través de tecnologías disruptivas.

1.13.1 Probióticos de próxima generación (NGP) y farmabióticos

Los NGP son diferentes de los probióticos tradicionales (*Lactobacillus* y *Bifidobacterium*), siendo un grupo de microorganismos comensales que carecen de un conocimiento de utilización como alimento, pero que poseen funciones metabólicas que son diferentes.

- ***Akkermansia muciniphila* y *faecalibacterium prausnitzii*:** A continuación, se escogen dos especies que son el objetivo de nuestra innovación actual por sus funciones de protección de la barrera intestinal y la capacidad de mitigar la inflamación

sistémica. La utilización de estas en los alimentos presenta un gran reto tecnológico por su sensibilidad al oxígeno que ha llevado a desarrollar técnicas de encapsulación de alta precisión en condiciones anaeróbicas (Zendeboodi y otros, 2020).

1.13.2 Edición genética CRISPR-Cas9 y seguridad dirigida

La tecnología CRISPR permite "programar" las bacterias benéficas con el objetivo de garantizar la seguridad:

- **Remoción de genes de virulencia:** Es posible mediante eliminación de plásmidos de resistencia a antibióticos, o genes de producción de aminas biógenas que no comprometan la viabilidad de la cepa.
- **Bacteriófagos sintéticos:** Se están creando fagos (virus de bacterias) que actúan como "misiles guiados" a fin de eliminar micros bióticamente patógenos como *Salmonella*, en líneas de procesamiento, pero sin afectar al microbiota positivo del alimento, lo que supone una alternativa ecológica a los desinfectantes químicos (Galanakis, 2020).

1.13.3 Impresión 3D y matrices alimentarias personalizadas

La impresión 3D en alimentos puede generar geometrías complejas que, a su vez, optimizan la viabilidad microbiana:

- **Micro-arquitecturas protectoras:** Se pueden imprimir alimentos con micro-arquitecturas que hacen de estructuras

internas que se comportan como "cápsulas de supervivencia" de probióticos que se protegen mecánicamente en la masticación y el tránsito gástrico.

- **Gradientes de prebióticos:** Al colocar en capas los prebióticos en las estructuras del alimento impreso se puede regular la tasa de fermentación y la liberación de postbióticos en diferentes tramos del tracto digestivo (Terpou y otros, 2019).

1.13.4 Inteligencia artificial (IA) y gemelos digitales microbiológicos

La inteligencia artificial (IA, por sus siglas en inglés) está revolucionando el modelado predictivo de la seguridad alimentaria:

- **Algoritmos de aprendizaje profundo:** Se utilizan para predecir las interacciones entre la matriz alimentaria y el microbioma, permitiendo formular simbióticos de precisión para perfiles de población específicos (por ejemplo, deportistas, personas de edad avanzada o neonatos).
- **Gemelos digitales:** se trata de copias virtuales de los procesos de fermentación que permiten simular cómo el cambio de temperatura que se introduce en la cadena de frío afecta a la viabilidad del probiótico y al riesgo de crecimiento de los patógenos y, por tanto, permite iniciativas de toma de decisiones en tiempo real (Salminen y otros, 2021).

1.13.5 Nanotecnología: Nanopostbióticos

La reducción de los postbióticos a nanómetros permite una biodisponibilidad que no se había visto hasta el momento. Los nanopostbióticos pueden integrarse en recubrimientos comestibles (films) que se aplican sobre frutas y verduras frescas cero, proporcionando un recubrimiento invisible que inhibe el crecimiento de hongos y proporciona un aumento de la vida útil sin cambiar el sabor ni el aspecto del producto fresco.

1.14 Métodos de evaluación experimental y validación científica

La validación de la funcionalidad y la seguridad de los agentes bióticos es una prueba que tiene carácter multidimensional y debe llegar a evidenciar que la cepa o compuesto no solo presenta actividad biológica, sino que también es tecnológicamente robusta dentro de una matriz compleja.

1.14.1 Protocolos de supervivencia gastrointestinal in vitro

Un probiótico es validado mediante modelos que simulan la cinética digestiva humana:

- **Modelo de digestión estática (protocolo INFOGEST 2.0):** Simula tres fases (oral, gástrica, intestinal) cumpliendo estrictamente el pH, la fuerza iónica y las concentraciones enzimáticas. Un probiótico solo se valida científicamente si después de una exposición a un pH aproximado de 2.0 y concentraciones de sales biliares del 0.3% p/v mantiene una mortalidad significativamente baja (Zendeboodi y otros, 2020).

- **Simulación dinámica avanzada:** El uso de sistemas como TIM-1 (TNO Intestinal Model) permite simular el vaciamiento gástrico progresivo y la absorción de metabolitos proporcionando una curva de viabilidad mucho más cercana a la fisiología, en comparación con los modelos estáticos.

1.14.2 Validación genómica y fenotípica de la seguridad

La validación moderna implica la utilización de Tecnologías de Secuenciación de Nueva Generación (NGS):

- **Whole Genome Sequencing (WGS):** Se utiliza para cartografiar el genoma completo de la cepa, considerando la validez científica negativa encontrando islas de patogenicidad o genes de resistencia a antibióticos transferibles (localizados en plásmidos o transposones).
- **Ensayos de adhesión celular:** Se emplean líneas celulares humanas (Caco-2 o HT-29) para medir la capacidad de la cepa de adherirse al epitelio, aunque la adhesión exitosa es un claro indicador de que el microorganismo tiene la capacidad de ejercer la inmunomodulación y la exclusión competitiva contra los patógenos (Terpou y otros, 2019).

1.14.3 Challenge tests y microbiología predictiva

Validad en la protección alimentaria significa inocular el alimento deliberadamente con patógenos "marcadores" (ej. *Listeria monocytogenes*).

- Se determina el Tiempo de Reducción Decimal *(D)* y se compara el crecimiento del patógeno en presencia o ausencia del agente biótico.
- Los datos se ajustan a los modelos matemáticos (ej. Baranyi y Roberts) a fin de poder predecir el comportamiento del patógeno a lo largo de la vida del alimento durante las condiciones del "frío controlado real".

1.15 Desafíos tecnológicos y perspectivas futuras

El paso del laboratorio al entorno industrial a escala de producción masiva de agentes bióticos está rodeado de retos de ingeniería y biofísica que delimitan la seguridad alimentaria del futuro.

1.15.1 La Barrera de la estabilidad termomecánica

El mayor reto es la integración de microorganismos vivos en alimentos no lácteos y no refrigerados:

- **Optimización de la liofilización y secado por aspersión:** El reto es minimizar la formación de cristales de hielo o el choque térmico que liquefacera la membrana celular. El futuro apunta al uso de vidrio biológico (matrices de azúcar en estado vítreo) que inmovilizan las células en un estado de latencia casi total, logrando estabilidad a temperatura ambiente durante más de 12 meses (Singh, 2018).
- **Resistencia a la extrusión:** En el caso de las barras de cereales y snacks, se estudia la selección de cepas formadoras de esporas

(*Bacillus coagulans*) que, de forma natural, soportan altas presiones y temperaturas, y que garantizan viabilidad durante el procesado industrial.

1.15.2 Simbióticos de precisión y diseño computacional

La visión de futuro es la de abandonar el planteamiento uno para todos.

- **Modelado metabólico a escala de genoma:** A través de la bioinformática se diseñarán combinaciones simbióticas en las que el prebiótico sea el único tipo de combustible del probiótico, así se logrará maximizar la producción de ácidos grasos de cadena corta o AGCC (butirato, por ejemplo).
- **Nutrición personalizada:** Se espera que el desarrollo de dispositivos portátiles o "wearables" que analizan el microbiota del consumidor, permita a la industria de los alimentos funcionales ofrecer productos que sean capaces de adaptar sus contenidos a las necesidades específicas según las deficiencias microbianas de cada consumidor (Singh, 2018).

1.15.3 Digitalización y trazabilidad (blockchain)

La seguridad alimentaria de los probióticos incorporará el Internet de los Objetos (IoT):

- Sensores inteligentes en el envase controlarán la viabilidad celular en tiempo real, advirtiendo al consumidor si se produce

una rotura de la cadena de frío generando una pérdida de dosis de funcionalidad o de su seguridad.

- El Blockchain asegurará que la cepa probiótica utilizada corresponde exactamente a la cepa validada en los ensayos clínicos, impidiendo el fraude alimentario y la sustitución de cepas (Galanakis, 2020).

Tabla 1.1. Comparativa técnica de agentes bióticos en la industria alimentaria

Atributo	**Probióticos**	**Prebióticos**	**Postbióticos**
Naturaleza	Microorganismos vivos (ej. *Lactobacillus*)	Sustratos químicos (Fibras/Carbohidratos)	Células inactivadas y sus metabolitos
Mecanismo de Acción	Colonización, exclusión competitiva y síntesis *in situ*.	Fermentación selectiva del microbiota endógeno.	Interacción directa de MAMPs con receptores del hospedador.
Estabilidad Térmica	Baja: Sensibles al calor, oxígeno y humedad.	Alta: Estables en la mayoría de los procesos industriales.	Muy Alta: Resisten pasteurización y procesos UHT.
Dosis Crítica	Mínimo $10^6 - 10^7$ UFC/g (Viabilidad).	Generalmente 3g - 8g por día (Cantidad).	Basada en la concentración de biomasa o metabolitos.
Seguridad	Riesgo mínimo de translocación en inmunosuprimidos.	Riesgo de malestar gastrointestinal en exceso.	Máxima: Sin riesgo de infección o

			transferencia de genes.
Rol en Inocuidad	Biopreservación activa (producción de bacteriocinas).	Modulación del pH luminal mediante AGCC.	Inhibición directa de patógenos y biofilms.

Fuente: Galanakis, (2020)

La Tabla 1.1, muestra una jerarquía de la estabilidad y la funcionalidad que son necesarias para la ingeniería de alimentos, siendo los probióticos el reto biotecnológico prioritario a causa su baja estabilidad térmica y la necesidad de conservar una dosis de viabilidad mínima para ser funcionales, sin embargo, los postbióticos son los óptimos para procesos industriales exigentes (como el UHT), ya que evitan los riesgos de infección y la complejidad de la supervivencia celular. Por su parte, los prebióticos constituyen el puente químico necesario cuya estabilidad fisicoquímica posibilita la funcionalización de matrices deshidratadas o de larga conservación.

Además de aumentar indirectamente la seguridad a través del control del pH y la producción de ácidos grasos de cadena corta (AGCC). En consecuencia, la combinación de todo ello evidencia que la transición de los postbióticos y prebióticos disminuye drásticamente las limitaciones logísticas de la cadena de frío sin menoscabar los mecanismos de biopreservación y protección del hospedador.

1.16 Discusión crítica: limitaciones, riesgos y controversias

El análisis conjunto de probióticos, prebióticos y postbióticos evidencia beneficios consistentes para la seguridad y funcionalidad de la alimentación, pero también pone de manifiesto limitaciones que no deben pasarse por alto. Gran parte de la evidencia clínica que en la actualidad soporta los efectos beneficiosos de estas herramientas biotecnológicas es específica de la cepa o del contexto experimental en el que se realizaron los ensayos; además, su extensión a otras cepas de la misma especie, a diferentes matrices alimentarias o a otras poblaciones de consumidores suponen una extensión que la comunidad científica en general consideran, en el mejor de los casos, preliminar (Sanders et al. 2019).

Desde la perspectiva de la inocuidad, todavía queda abierto un campo de controversias: el riesgo (aunque bajo) de translocación bacteriana o de transferencia horizontal de genes de resistencia a antibióticos en población inmunocomprometida aún continúa bajo vigilancia, la cantidad de método de cuantificación (UFC/g, biomasa, concentración de metabolitos, etc.) dificulta la comparación entre las formulaciones comerciales; el control de calidad que la industria de suplementos y alimentos funcionales se autoimpone no siempre puede asegurar que la dosis declarada en el etiquetado coincide con la dosis viable o activa en el momento del consumo control de calidad que la industria de suplementos y alimentos funcionales se autoimpone no siempre puede asegurar que la dosis declarada en el etiquetado coincide con la dosis viable o activa en el momento del consumo.

A ello se añade el reto normativo que se ha señalado para los postbióticos y que, en menor medida, también es extensible a los probióticos de nueva generación, cuya norma armonizada a escala internacional continúa en construcción. Ello no implica que se desestime el potencial de estas herramientas biotecnológicas, sino que su incorporación a los sistemas de gestión de la inocuidad alimentaria tiene que ir acompañada de validaciones concretas, trazabilidad analítica y de comunicación al consumidor.

Capítulo II

2 Bioprocesos y fermentación controlada: innovación para la inocuidad y calidad de los alimentos

La transformación de la fermentación, un arte primitivo fundado en la espontaneidad, en la industria alimentaria moderna, que evoluciona hacia una ciencia rigurosa llamada bioprocesamiento, determina que los bioprocesos sean la primera moda científica movilizadora de la microbiología aplicada, la bioquímica y la ingeniería química. Los bioprocesos son sistemas controlados que maximizan la eficiencia de la bioconversión de materias primas. A diferencia de las prácticas tradicionales, la fermentación controlada hace uso de un conocimiento exacto de las cinéticas del crecimiento y de las vías metabólicas para estandarizar la producción. De esta manera, se asegura que cada lote cumpla con estrictos niveles de calidad funcional y sensorial y se manipulan o eliminan las variaciones propias de los sistemas biológicos vivos (Galanakis, 2020).

El presente capítulo analiza la arquitectura de los bioprocesos como una estrategia maestra de innovación de la inocuidad de los alimentos. A partir de los biorreactores, el control de variables físicoquímicas y la automatización, se determinará la forma en que la manipulación intencionada del entorno microbiano no solo permite alargar el periodo de caducidad de productos, sino que además permite incrementar la biodisponibilidad nutricional y acortar riesgos toxicológicos. De los principios cinéticos a las tendencias de la digitalización e industria 4.0,

este apartado dibuja el mapa de las condiciones que se deben producir para transformar las matrices agroindustriales en alimentos orientados a un alto valor añadido a partir de sistemas de fermentación más eficaces, seguros y escalables.

2.1 Principios de los bioprocesos en la industria alimentaria

Un bioproceso en la industria de alimentos se entiende como la puesta en práctica de principios de ingeniería y biología de la transformación de materias primas utilizando agentes biológicos como son microorganismos y/o enzimas para producir a partir de materias primas productos con propiedades funcionales y de seguridad mejoradas. En comparación con los tradicionales procesos químicos, los bioprocesos se llevan a cabo bajo condiciones moderadas de temperatura, presión y pH, circunstancia que es clave para conservar el estado de compuestos termolábiles y vitaminas (Singh, 2018).

2.1.1 Arquitectura del bioproceso: Upstream y downstream

La operación de un bioproceso industrial consta de un número de pasos secuenciales que permiten garantizar la eficiencia y pureza del producto final. Tal y como menciona Galanakis (2020), estas etapas se agrupan en:

- **Procesamiento Inicial (Upstream):** Consiste en la elección de la cepa microbiana, formulación del medio de cultivo y la esterilización. En esta fase resulta vital garantizar que el sustrato

esté equilibrado para evitar desviaciones metabólicas que den origen a subproductos no deseados (Zendeboodi y otros, 2020).

- **Bioreacción:** La etapa donde se realiza la bioconversión es la central y principal. En esta parte es muy relevante controlar la transferencia de masa y energía para garantizar la viabilidad celular y la productividad de metabolitos protectores.
- **Procesamiento final (Downstream):** Consiste en el proceso de recuperación de la biomasa o de los metabolitos, así como en aquellas etapas que son de purificación, estabilización, etc. Según lo descrito por Terpou et al. (2019), para el ámbito de la agroindustrial y en dicho proceso, incluye en este punto, distintos tipos de técnicas de separación como centrifugación, filtración en membrana, etc., con el fin de conseguir que el agente funcional mantenga su actividad biológica.

2.1.2 Estequiometría y eficiencia de conversión

El fundamento del diseño del bioproceso es la cuantificación de los rendimientos. El coeficiente de rendimiento biomasa/sustrato ($Y_{x/s}$) y el rendimiento producto/sustrato ($Y_{p/s}$) permiten conocer la viabilidad económica de la operación. Tal como se establece en Zendeboodi et al. (2020), la optimización de dichos parámetros permitirá que el microorganismo aproveche la mayor cantidad de carbono disponible para dar lugar a compuestos interesantes, como los ácidos orgánicos o los péptidos antimicrobianos a la vez que reduzca al mínimo la producción de residuos.

2.1.3 Homeostasis y control del entorno

Uno de los principios vitales en el bioprocesamiento alimentario es la homeostasis tecnológica o la necesidad de mantener la homeostasis tecnológica. Esto quiere decir que es necesario regular de forma precisa aquellas variables críticas (temperatura, pH y actividad de agua) que favorecen el crecimiento del cultivo iniciador frente a la acción del microbiota competidora. Según Singh (2018), la uniformidad del sistema es lo que permite que la fermentación pueda ser considerada un método de conservación fiable y con capacidad de ser reproducido a nivel industrial, y no sólo de un deseo artesano.

2.2 Bases bioquímicas y cinéticas de la fermentación

La fermentación es un proceso de tipo metabólico de óxido-reducción en el que los mismos compuestos orgánicos actúan como donantes y como aceptores de electrones, sin poder depender de una cadena de transporte externa de electrones. En la industria alimentaria esta cuestión no se debe considerar únicamente como la vía de obtención de energía para el microorganismo, sino que además es el motor biofísico que transforma las distintas propiedades químicas de la matriz que permite garantizar la estabilidad y la seguridad microbiológica de la misma (Zendeboodi y otros, 2020).

2.2.1 Bioquímica de la transformación y rutas metabólicas

La efectividad de un bioproceso depende notablemente de la ruta metabólica utilizada por el microorganismo escogido. En este sentido,

Singh (2018) resalta que la fermentación láctica es la esencia de la seguridad, donde el piruvato obtenido de la glucólisis se transforma en ácido láctico. De esta forma, existe una acumulación de protones (H^+) que provocan un descenso del pH del alimento por debajo de 4.61, valor crítico para evitar la proliferación de patógenos, como *Clostridium botulinum*. Galanakis (2020), por su parte, apunta que la fermentación heteroláctica supone un nivel de complejidad adicional al generar también etanol y CO^2 metabolitos que, además de tener características sensoriales, establecen un entorno anaeróbico desfavorable para el crecimiento de los mohos y levaduras alterantes.

2.2.2 Cinética del crecimiento microbiano: El modelo de Monod

Para la estandarización industrial es necesario poder cuantificar la velocidad de incrementación de la población microbiana.La cinética microbiana permite anticipar el tiempo que se necesita para llegar a alcanzar la densidad celular crítica. Terpou et al. (2019), dicen que la relación entre la tasa de crecimiento específico (μ) y la concentración de sustrato limitante (*S*), sigue la Ecuación de Monod:

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_s + S}$$

Donde μ_{max} es la capacidad máxima de crecimiento del microorganismo y K_s la afinidad por el nutriente. En el caso de la agroindustria, entender estos parámetros permite a los técnicos evitar la "muerte por sustrato" y la no llegada del inóculo al tiempo óptimo para estar en fase exponencial para una, biopreservación (Singh, 2018).

2.2.3 Estequiometría y rendimientos de conversión ($Y_{p/s}$)

La viabilidad de un sistema fermentativo se analiza mediante la eficiencia de conversión de su materia prima en producto. Según los autores Zendeboodi et al. (2020), el coeficiente de rendimiento producto/sustrato ($Y_{p/s}$) indica en cuántos gramos de ácido, alcohol o bacteriocina se obtienen, conversiones por gramo de sacarosa consumido. Un bioproceso optimizado tiene como objetivo maximizar este rendimiento para reducir los costos de explotación y, debido a ello, minimizar en lo posible la generación de subproductos no deseados, pues se pueden comprometer de esta manera la calidad sensorial para el consumidor o la vida útil del producto final.

2.3 Fermentación tradicional y fermentación controlada

El avance de la fermentación espontánea a la fermentación controlada supone uno de los grandes hitos de la seguridad alimentaria industrial que ha pasado de ser un proceso basado en la sucesión ecológica natural a un proceso que se basa en la estandarización biotecnológica (Galanakis, 2020).

2.3.1 Fermentación tradicional o espontánea

Esta modalidad de fermentada se basa en la actividad del microbiota "silvestre" o endógena que está presente de forma natural a partir de la materia prima o del espacio de procesamiento. En conformidad con lo indicado por Singh (2018), aunque este sistema es responsable de la

riqueza sensorial de muchos productos artesanales también conlleva riesgos inherentes:

Falta de reproductibilidad: La carga microbiana inicial permite variaciones significativas en cuanto al sabor, textura y vida útil entre diferentes lotes.

Vulnerabilidad sanitaria: Como no existe ningún control sobre el inóculo, los microorganismos competidores o patógenos (enterobacterias o mohos productores de micotoxinas, por ejemplo) pueden proliferar antes de que el sistema llegue a alcanzar el pH protector (Terpou y otros, 2019).

2.3.2 Fermentación controlada e industrial

La fermentación controlada se caracteriza por la inoculación de la materia prima con cultivos iniciadores (*starter cultures*) después de un tratamiento higienizador previo (se puede pasteurizar, etc). Como apuntan Zendeboodi et al.(2020), este sistema proporciona una dominancia microbiana instantáneamente, lo que redundará en beneficios estratégicos:

Seguridad por diseño: La rápida caída en el pH y la precoz producción de bacteriocinas reducen la ventana de oportunidad para el desarrollo de patógenos de origen alimentario.

Eficiencia operativa: La eliminación de la fase inicial de competencia disminuye el tiempo de bioprocesado total, maximizando la

performance de los biorreactores y reduciendo los costes energéticos (Galanakis, 2020).

Estandarización sensorial: Permite anticipar el perfil de metabolitos volátiles de forma precisa, atendiendo así a que el producto final mantenga exactamente las mismas características organolépticas que el consumidor de productos globales busca.

2.4 Microorganismos fermentativos de interés agroindustrial

El proceso de selección de los microorganismos en agroindustria no se produce de forma aleatoria, sino que proviene de la búsqueda de cepas con robustez tecnológica, estabilidad genética y un perfil metabólico que avale la inocuidad. Para Galanakis (2020) estos agentes biológicos cumplirán criterios de seguridad que nos son conocidos internacionalmente, el estado GRAS (*Generally Recognized as Safe*) de la FDA o la presunción cualificada de seguridad (QPS) de la EFSA.

2.4.1 Bacterias Ácido-Lácticas (BAL): Los biopreservantes primarios

Las BAL son el más importante de los grupos de microorganismos en biotecnología alimentaria. Según refiere Singh (2018), géneros como Lactobacillus (ahora en un numeroso conjunto de géneros varios, *Lacticaseibacillus, Limonisibacillus*, etc.), *Lactococcus* y *Pediococcus* son clave en la conversión de azúcares en ácido láctico; al acidificarse rápidamente el producto, el pH se reduce a niveles inhibitorios para bacterias patógenas. Por su parte, Zendeboodi et al. (2020) han mostrado que muchas BAL producen bacteriocinas que son péptidos

antimicrobianos que atacan de una forma especial a los Gram-positivos más resistentes como *Listeria monocytogenes*, lo que añade mayor seguridad.

2.4.2 Levaduras: Producción de etanol y perfiles aromáticos

La levadura *Saccharomyces cerevisiae* es el estándar mundial en la producción de pan, cerveza y vino, gracias a su tolerancia al alcohol y su eficiencia de producción. No obstante, Terpou et al. (2019) afirman que en la actualidad la agroindustria comienza a utilizar levaduras "no-*Saccharomyces*" (por ejemplo, *Kluyveromyces marxianus* o *Debaryomyces hansenii*) que son apreciadas por su capacidad para asimilar lactosa, producción de enzimas proteolíticas durante la maduración del queso o degradación de factores antinutricionales en matrizes vegetales, mejorando así la biodisponibilidad de minerales.

2.4.3 Hongos filamentosos en la valorización de residuos

El uso de mohos, sobre todo de los géneros *Aspergillus* y *Rhizopus*, es uno de los puntos críticos para procesos de la Fermentación en Estado Sólido (SSF). Galanakis (2020) explica, por el contrario, que los hongos son usados para la síntesis industrial de ácidos orgánicos (ácido cítrico) y/o enzimas (pectinasas y amilasas) que posteriormente se utilizan para facilitar extracción de jugos o clarificación de bebidas. Así mismo, para la bioconversión de subproductos agrícolas en ingredientes de alto valor proteico, también son utilizados en la agroindustria.

2.4.4 Cultivos adjuntos y de protección

A diferencia de los iniciadores que también tienen la función de provocar un cambio en la textura o sabor, los cultivos protectores son seleccionados únicamente por su capacidad para inhibir el microbiota alterante. De acuerdo con Singh (2018), cepas de *Carnobacterium* o *Bifidobacterium* juegan el papel de "centinelas" en productos mínimamente procesados, ya que su presencia impide que, a pesar de una rotura de la cadena del frío, patógenos como *Salmonella* o *Escherichia coli*, crezcan mediante un mecanismo de exclusión competitiva o por producción de metabolitos bioactivos, tal y como también se señala (Zendeboodi y otros, 2020).

2.5 Control de variables físicas y químicas del proceso

El éxito de una fermentación controlada a escala industrial se fundamenta en el control de las variables para que la biorreactor tenga su homeostasis tecnológica controlada. De acuerdo con Galanakis (2020), el control exacto de las variables fisicoquímicas no sólo maximiza el rendimiento de los productos, sino que también actúa como un importante límite de bioseguridad, pues en ese contexto se establece un ambiente hostil para la microbiota competidora y patógena.

2.5.1 Temperatura: El regulador cinético

La temperatura es la variable física más determinante pues regula la velocidad de todas las reacciones enzimáticas intracelulares. Para

Singh (2018), cada cultivo iniciador presenta una temperatura óptima (T_{opt}) para que su velocidad de crecimiento (μ) sea máxima, una temperatura que si se eleva puede provocar la desnaturalización de proteínas e incluso causar una muerte celular. Una temperatura inferior a la óptima alarga la fase *lag* y aumenta el riesgo de colonización de la matriz por los microorganismos psicrótrofos alterantes. El control tecnológico de la temperatura es también fundamental en la industria para controlar el calor metabólico que se puede llegar a generar durante la fermentación y prevenir así que el sistema se inhiba a sí mismo por tensión térmica (Zendeboodi y otros, 2020).

2.5.2 Control de pH y acidez titulable

El pH es el indicador químico más comúnmente empleado para controlar el avance de la fermentación. De acuerdo con Terpou et al. (2019), el descenso en el pH producido por los ácidos orgánicos (principalmente los ácidos láctico y acético) es el mecanismo de biopreservación más ampliamente extendido. Llevar a cabo un control exhaustivo de la misma permite que el producto llegue al "punto isoeléctrico" o, por lo menos, a un nivel de seguridad como la microbiológica (generalmente pH <4.6) en el tiempo establecido. Según Zendeboodi et al. (2020), en bioprocesos de alta densidad se utilizan sistemas de retroalimentación (*feedback*) que permiten incorporar agentes neutralizantes o sustratos con el fin de no llegar a acidificaciones excesivamente altas que puedan inhibir al propio cultivo iniciador.

2.5.3 Actividad de agua (a_w) y potencial redox (Eh)

La actividad del agua es una variable que se vuelve crítica en las fermentaciones en estado sólido (SSF) y en los productos de humedad intermedia. De acuerdo con Galanakis (2020), unos niveles de (a_w) bajos pueden inducir a la limitación en la difusión de los nutrientes a la célula microbiana. En dicho sentido, el potencial de óxido-reducción (Eh) delimita el si el medio favorece un tipo de rutas fermentativas o respiratorias. Singh (2018) manifiesta que la manipulación del Eh mediante la sustitución del oxígeno por gases inertes (como N^2o CO^2) es un procedimiento común para hacer predominar a las bacterias en las condiciones anaerobias estrictas o facultativas, a la vez que evita la oxidación de los lípidos del alimento.

2.5.4 Oxígeno disuelto (dO_2) y agitación

En los bioprocesos aerobios o microaerofílicos, la disponibilidad de oxígeno es a menudo el factor limitante. En este sentido, Terpou et al.(2019) también agrega que la agitación mecánica no solo garantiza la uniformidad térmica como en el caso de los nutrientes, sino que también consigue que el coeficiente de transferencia de oxígeno ($k_L a$) se maximice. Un control deficiente de la aireación puede conducir a que el microorganismo cambie su vía metabólica hacia otras fermentativas deseadas, lo que drásticamente disminuiría el rendimiento de biomasa o de metabolitos determinados.

2.6 Diseño y operación de bioreactores alimentarios

El biorreactor o fermentador es el elemento base de todo proceso biotecnológico agroindustrial, por lo que debe concebirse para garantizar un ambiente rigurosamente controlado que minimice los gradientes de concentración y los de temperatura, al mismo tiempo que garantice la protección del cultivo contra toda contaminación externa. La ingeniería de estos sistemas ha evolucionado para optimizar la productividad biológica mediante el control automático y mediante la concepción higiénica según Galanakis (2020).

2.6.1 Configuración y tipos de biorreactores

La elección de la ordenación física de los mismos depende de la sensibilidad del microorganismo y de las propiedades reológicas del alimento. Según Terpou et al. (2019) los modelos de biorreactores más comunes en la actualidad son:

Biorreactor de Tanque Agitado (STR - Stirred Tank Reactor): Este es el modelo de referencia en la industria, donde se recurren a sistemas de agitación mecánica (impulsores) para asegurar condiciones homogéneas. Se trata de un sistema ideal para la producción de biomasa de las bacterias lácticas y de las enzimas, aunque su alto cizallamiento es capaz de destruir a las células más sensibles (Singh, 2018).

Reactor de columna de burbujas y airlift: El mezclado es posible mediante aire o gas inyectado en su base y sobre la base de Zendeboodi et al. (2020), estos sistemas son los más empleados para microorganismos poco resistentes al cizallamiento y para la

transferencia de oxígeno altamente eficiente sin recurrir a la agitación mecánica.

Biorreactores de lecho fijo y empacado: El único uso es la fermentación en estado sólido (SSF) y la maduración de productos tradicionales donde el soporte sólido actúa como sustrato y soporte físico para los hongos o bacterias.

2.6.2 Modos de operación y estrategias de cultivo

La operación del biorreactor define la cinética de formación del producto y la eficiencia del sustrato. Terpou et al. (2019) clasifican las estrategias de operación en tres modalidades principales:

Lote (Batch): Una estrategia de tipo cerrado donde las entradas y las salidas de material son nulas durante la operación del proceso. Este modo de operación es muy apreciado en la industria alimentaria por su simplicidad y por su bajo riesgo de contaminación, puesto que permite una trazabilidad muy clara por lotes.

Lote Alimentado (Fed-Batch): La estrategia se estudiará con incremento de adición de sustrato. Según el estudio de Singh (2018), esta técnica es importante para evitar la inhibición por exceso de sustrato (efecto Crabtree en levaduras) y para conseguir densidades celulares muy elevadas, necesarias para la producción de probióticos concentrados.

Continuo (Quimiostato): La estrategia implica la adición de medio fresco y la obtención del producto de forma simultánea.A pesar de que presenta la mayor productividad, su aplicación en alimentos es restringida debido a la dificultad de mantener la esterilidad durante un tiempo prolongado y el potencial de deriva genética del microorganismo (Galanakis, 2020).

2.6.3 Diseño higiénico y escalabilidad

Uno de los principios que no se puede renunciar a incluir en el diseño de biorreactores alimentarios es el diseño higiénico (normativa EHEDG - European Hygienic Engineering & Design Group). Zendeboodi et al. (2020) subrayan que las superficies tienen que ser de acero inoxidable electropulido a fin de evitar la formación de biofilms de patógenos. Además, el escalado (*scale-up*) del proceso exige que variables como la potencia de agitación por unidad de volumen (P/V) y el coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno ($k_L a$) sean constantes para asegurar que el rendimiento conseguido en el laboratorio pueda ser reproducido en tanques de miles de litros (Singh, 2018).

2.7 Fermentación como estrategia de conservación de alimentos

La fermentación se establece como estrategia de biopreservación principal y que facilita la vida útil del alimento gracias a una modificación intencional del ecosistema del alimento. Así, la fermentación considera la acción de los microorganismos elegidos para la generación de barreras biológicas y físicas que inhiben el microbiota

alterante y/o patógena de la materia prima, así como también la formación de compuestos antimicrobiano debidos a los productos de la fermentación (Galanakis, 2020).

2.7.1 Mecanismos de acción en la conservación

La práctica de la fermentación (o conservación fermentativa) es la expresión de los mecanismos de conservación basados en la generación de varios factores que trabajan en forma conjunta (teoría de obstáculos/*hurdle technology*). De acuerdo con Singh (2018), se presentan los mecanismos más relevantes:

Acidificación orgánica: La producción de ácidos láctico, acético y propiónico favorecerá la reducción del pH del medio, lo que conducirá a una desestabilización de la envoltura celular de los patógenos y un medio hostil para la replicación de los mismos.

Reducción del potencial redox (*Eh*): El consumo del oxígeno presente en la matriz alimentaria por parte de los microorganismos fermentadores, así como la producción de CO2 propician la limitación del desarrollo de las bacterias aerobias alterantes y evitan la oxidación lipídica del alimento (Zendeboodi y otros, 2020).

Producción de metabolitos antimicrobianos: En cuyo caso la producción de la reuterina, peróxido de hidrógeno y bacteriocinas actúan de manera específica contra patógenos grampositivos y gramnegativos, lo que permitirá asegurar la inocuidad del alimento de modo que no sea preciso el uso de conservantes químicos sintéticos.

2.7.2 Impacto en la estabilidad de matrices alimentarias

La fermentación favorece la estabilización de las materias primas altamente perecederas (leche, carne, vegetales). Terpou et al. (2019), indican que la fermentación favorece la transformación de los azúcares sencillos para dar lugar a compuestos muy estables. De este modo se elimina la fuente de energía de los microorganismos de la putrefacción. Por esa razón, productos como el yogur, el salami o el chucrut disponen de una vida útil mayor que la de las materias primas de base manteniendo su inocuidad incluso en el caso de ser sometidas a una refrigeración moderada (Galanakis, 2020).

2.7.3 Exclusión competitiva y nicho ecológico

Otro principio básico en la conservación biótica es la exclusión competitiva. Según Zendeboodi et al. (2020), la inoculación de cultivos iniciadores a concentraciones elevadas hace que estos saturen el nicho ecológico del alimento, agoten los nutrientes disponibles y ocupen los sitios de adhesión. A consecuencia de este fenómeno, los patógenos accidentales como *Salmonella* o *Escherichia coli* no logran establecerse y reproducirse en la matriz alimentaria (Singh, 2018).

2.8 Mejora de la calidad nutricional mediante bioprocesos fermentativos

Para el ámbito de la nutrición, la calidad de los alimentos es uno de Los problemas más importantes de un sistema alimentario en relación con opciones de alimentación ante el crecimiento de la población, la

inseguridad alimentaria y el crecimiento de la deficiencia de micronutrientes. Los bioprocesos fermentativos se pueden presentar, en este contexto, como un recurso biotecnológico estratégico que permite modificar y enriquecer los alimentos con características nutricionales, funcionales y biológicas. La fermentación controlada y adecuadamente diseñada puede optimizar la biodisponibilidad de nutrientes básicos, limitar los efectos de los factores antinutricionales, e incluir compuestos bioactivos con efectos positivos para la salud de las personas.

2.8.1 Fermentación como estrategia para la biodisponibilidad y biofortificación

La fermentación se ha reconocido como una herramienta biotecnológica significativa para incrementar la calidad nutricional de alimentos de origen vegetal y de cereales. En los últimos años, distintos estudios revisados por pares han corroborado que los procesos fermentativos aumentan la bioaccesibilidad de minerales esenciales (Fe, Zn, Ca) como resultado del proceso de degradación de los antinutrientes, tales como los fitatos y los taninos, a partir de la acción enzimática llevada a cabo por la microflora microbiana de los fermentos (enzimas fitas). Por ejemplo, se ha demostrado que en el caso de los productos fermentados tradicionales (injera de mijo perla) se ha incrementado la bioaccesibilidad de hierro (de 62.1% a 73.5%) y de zinc (de 53.8% a 83.3%) en comparación con los productos no fermentados, de forma directamente relacionada con la disminución de los compuestos quelantes de los minerales (Yehuala et al., 2025).

Por añadidura, revisiones recientes resaltan que la fermentación no solo promueve la disminución del contenido de antinutrientes, incremento de algunos nutrientes como el contenido de compuestos bioactivos como vitaminas del complejo B (en particular vitaminas B2, B9 y B12) y de ácidos grasos funcionales, los cuales se generan como parte de los propios procesos de metabolismo microbiano durante la fermentación. Y los cambios en los parámetros cercanos a estos valores son evidentes especialmente en sistemas de fermentación de alimentos en donde se usan cultivos iniciadores controlados o cepas lácticas específicas.

Implicación práctica: los procesos de fermentación de alimentos básicos (cereales, legumbres, tubérculos) podrían contrarrestar la deficiencia de micronutrientes presentes en poblaciones de bajo ingreso sin la adopción de post-fortificaciones industriales.

Mecanismos fisiológicos: Microorganismos como Lactiplantibacillus plantarum, Leuconostoc mesenteroides, Bifidobacterium spp., etc., tienen enzimas degradadoras de compuestos que inhiben la absorción de minerales. Por ejemplo, la acción de la fitasa microbiana liberar fosfatos y minerales ligados mejorando potencialmente la absorción intestinal.

2.8.2 Disminución de antinutrientes y producción de compuestos funcionales

La fermentación no solo incrementa la biodisponibilidad de los micronutrientes, sino que también incrementa la digestibilidad de las

proteínas y modifica de forma positiva los perfiles de los aminoácidos. La co-fermentación utilizando bacterias como Weizmannia coagulans y Bacillus subtilis junto con la suplementación enzimática ha sido un enfoque utilizado para mejorar la calidad nutritiva de los subproductos agrícolas como por ejemplo la harina de maní, potenciando el incremento de los aminoácidos libres y la reducción de compuestos tóxicos como la aflatoxina (Kitessa, 2024).

La fermentación de los vegetales también estimula la generación de compuestos funcionales como los péptidos bioactivos, los prebióticos o los ácidos grasos de cadena corta (SCFA), lo que favorece la salud intestinal y metabólica convirtiendo a la fermentación no solo en un proceso nutritivo, sino también funcional y preventivo (Lim et al., 2025).

2.9 Impacto de la fermentación en la calidad sensorial de los alimentos

Más allá de los efectos que ejerce sobre la composición nutricional, la fermentación tiene un papel indiscutible en la calidad sensorial de los alimentos, que influye en la aceptación de los consumidores y el desarrollo comercial de los productos alimentarios. Por tanto, los procesos bioquímicos, así como los procesos biofísicos implicados en la actividad microbiana afectan a propiedades como el sabor, el aroma, la textura y la apariencia de los productos. Por otra parte, muchas de las estrategias de fermentación en sistemas alimentarios tradicionales y emergentes, son utilizados de manera muy eficaz en la producción de

productos plant-based, para ayudar a mejorar sus propiedades organolépticas, sin aditivos artificiales.

2.9.1 Efecto biofísico en texturas y sabores

La fermentación transforma radicalmente las propiedades físico-químicas de los alimentos mediante la acción de microbios y de sus enzimas. La degradación de carbohidratos complejos y de proteínas da lugar a compuestos volátiles que intensifican el aroma y el sabor; la transformación de matrices alimentarias debidas al ácido láctico y a otros metabolitos modifica la textura y la reología del producto final.

En el caso de un cereal fermentado, por ejemplo, la fermentación de un cereal por cultivos iniciadores aumentó hasta cerca del 95% los totales de compuestos fenólicos y antioxidantes, de forma que moduló no solo las propiedades nutricionales, sino que también las sensoriales del producto final (Mikulajová et al., 2024).

Los compuestos volátiles que se liberan durante la fermentación (alcoholes, ácidos orgánicos, ésteres) contribuyen de forma directa a unos perfiles aromáticos más complejos y, normalmente, más aceptados por los consumidores, especialmente cuando se trata de fermentaciones controladas y con cultivos iniciadores caracterizados.

2.9.2 Cultivos iniciadores de fermentación y aceptación del consumidor

La implementación de cultivos iniciadores de fermentación específicos hace posible ajustar el proceso fermentativo a fin de optimizar las características sensoriales. Por un lado, estos cultivos permiten acelerar el proceso fermentativo, pero, por otro, también pueden llegar a ser responsables de la producción de compuestos que mejoran el color, la textura o el "mouthfeel" sin añadir aditivos. Esto resulta especialmente relevante para productos del tipo plant-based, donde la fermentación puede reducir determinados sabores a amargo o a "bean", o determinadas texturas que a menudo limitan la aceptación del consumidor (Dhiman et al., 2025).

Estas propiedades sensoriales son clave para la adopción de productos funcionales y nutritivos en mercados masivos, dado que la nutrición tiene que ir acompañada de aceptación organoléptica si se quiere que sea efectiva a nivel poblacional.

2.10 Reducción de contaminantes y riesgos microbiológicos

La fermentación, además de mantener ciertas características nutricionales y sensoriales, puede ser un punto crítico para la seguridad microbiológica de los alimentos. Por más que durante la fermentación sean los microorganismos deseables los que predominan, el riesgo de que los contaminantes microbiológicos (patógenos o microorganismos alterantes, etc.) se conviertan en una amenaza para la inocuidad alimentaria, provocando así brotes de las enfermedades transmitidas por los alimentos, es muy real. Por todo ello, las estrategias de reducción, detección y control de contaminantes microbiológicos se

han convertido en un importante eje de investigación que reúne las metodologías clásicas, moleculares y metagenómicas en una línea de investigación con evidencia científica reciente para conseguir formas con la seguridad alimentaria.

2.10.1 Detección y control microbiano en los procedimientos fermentativos

Contar con un aparato de detección de microorganismos peligrosos o alterantes en procesos fermentativos es un punto de partida en el camino hacia la producción de alimentos seguros. En este sentido, las técnicas de análisis han evolucionado de los métodos de cultivos tradicionales hacia otras basadas en técnicas moleculares y genómicas que permiten detectar, cuantificar y monitorear poblaciones microbianas de manera muy eficaz, lo cual es importante sobre todo cuando las matrices fermentadas son complejas y albergan tanto microbiota deseable como microorganismos indeseables.

a) Detección a través de enfoques integrados

La combinación de un enfoque cultural con tecnologías avanzadas da una visión más completa sobre la microbiología de fermentaciones como se muestra en la Tabla 2.1:

qPCR y PCR en tiempo real (qPCR): La detección y cuantificación de patógenos en alimentos fermentados se produce con alta sensibilidad, acortando tiempos en comparación con cultivos clásicos. Una referencia ejemplar a continuación describe métodos recientes de

detección y gestión de microorganismos de transmisión alimentaria en la industria alimentaria (Possas & Pérez, 2024).

Metagenómica de alto rendimiento: Los métodos de secuenciación shotgun permiten trazar contaminaciones microbianas en productos fermentados, tanto de especies como de organismos genéticamente modificados y genes, como, por ejemplo, genes de resistencia antimicrobiana, que no eran siempre detectados mediante métodos tradicionales. Un artículo revolucionario de 2025 presenta la aplicación de esta técnica como útil para discernir los perfiles de contaminaciones de productos de fermentación industrial (D'aes et al., 2025).

Tabla 2.1 Métodos de detección microbiológica aplicados en fermentación

Método analítico	Principio	Aplicación
Cultivo en medios selectivos	Crecimiento de microorganismos viables	Control de rutina de calidad
qPCR	Amplificación cuantitativa de ADN de patógenos	Detección dirigida de patógenos
Secuenciación metagenómica	Secuenciación total de ADN microbiano	Perfil completo de comunidades y contaminaciones
Biosensores moleculares	Señales bioquímicas (pH, volátiles, metabolitos)	Monitoreo en tiempo cercano a real

Fuente: D'aes et al., (2025)

2.10.2 Prevención de riesgos microbianos en los puntos críticos del proceso

Más allá de llevar a cabo una detección de microorganismos potencialmente peligrosos:

La prevención, en la medida en que se puede hacer, es la estrategia más efectiva para evitar la presencia de riesgos microbianos en el proceso de fabricación de alimentos (lo cual es especialmente necesario si el proceso de fabricación de alimentos es largo y complicado). Por lo que se refiere a la prevención, se pueden gestionar adecuadamente las materias primas, controlar las condiciones del entorno durante la fermentación y sistemas de gestión de seguridad alimentaria, como el sistema de Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (APPCC/HACCP), los cuales implementan medidas preventivas controlando puntos críticos del proceso donde pueden proliferar los contaminantes como se muestra en la Tabla 2.2.

- pH y temperatura: mediante un ajuste de pH ácido y temperaturas de fermentación controladas se pueden reducir los niveles microbianos y así disminuir la supervivencia de los patógenos.
- Actividad de agua (a_a): la reducción de la actividad de agua mediante el uso de sal o mediante deshidratación puede limitar la proliferación microbiana.
- Buenas Prácticas de Manufactura (BPM): la higiene del personal, la correcta limpieza de las superficies y el correcto manejo de los insumos controlan el riesgo de contaminación cruzada.

Estas medidas preventivas se alinean con las recomendaciones prácticas muy bien establecidas en la literatura científica sobre seguridad alimentaria en las fermentaciones (Oteiza & Barril, 2020).

Tabla 2.2 Etapas críticas del proceso fermentativo y medidas preventivas

Etapa del proceso	Riesgo microbiológico	Medida preventiva
Recepción de materia prima	Contaminación inicial	Control de proveedores y pruebas de calidad
Preparación del medio	Proliferación de contaminantes	Inspección de higiene y sanitización
Fermentación	Crecimiento no deseado	Control riguroso de pH, T°, sal
Post-fermentación / almacenamiento	Recontaminación	Enfriamiento, almacenamiento seguro

Fuente: Oteiza & Barril, (2020)

2.11 Monitoreo y control de procesos fermentativos

Llevar a cabo el monitoreo y el control de los procesos fermentativos puede ser considerado como una de las piezas fundamentales que contribuye a la carga de calidad, seguridad y reproducibilidad en la producción de los alimentos fermentados. Los avances tecnológicos de la última década han permitido avanzar hacia los sistemas inteligentes, que integran sensores, Internet de las Cosas (IoT), inteligencia artificial y modelos predictivos, con un claro avance desde los controles manuales hasta los sistemas que aportan información en tiempo real que refleja variables de procesos clave (pH, temperatura,

concentración de metabolitos, etc.) y que permiten reaccionar ante desviaciones in situ y con ello reducir riesgos operativos, y mejorar la eficiencia de los bioprocesos alimentarios.

2.11.1 Sensores IoT aplicados a sistemas fermentativos

Los sensores de IoT han cambiado la manera tradicional de llevar a cabo el control de los procesos fermentativos logrando un monitoreo continuo de las variables fisicoquímicas y microbiológicas en tiempo real. La unión sensores inteligentes con plataformas de comunicación de datos no solo permite recopilar los datos de forma remota, sino que también proporciona información a los algoritmos del análisis de la información que se encargan de optimizar el proceso y minimizar la variabilidad del producto final.

a) Aplicaciones de sensores IoT en fermentación

La literatura más reciente ha analizado las aplicaciones de sensores de IoT para la obtención de datos críticos, y se describen como (Hamidah et al., 2024):

- Monitoreo de pH y temperatura: La combinación de sensores de pH y temperatura junto a procesos IoT se puede utilizar para ajustar las condiciones de manera automática en el control de fermentaciones como la del vinagre o el café, con la consiguiente obtención de condiciones óptimas para el tipo de crecimiento microbiano deseado, ya que la implementación de procesos de IoT con control “fuzzy” ha llegado a conseguir la reducción del

tiempo de fermentación y la estabilización de variables de proceso críticas.

- Control de acidez y conductividad: En productos lácteos tradicionales como el ama si se puede integrar una propuesta de sistemas IoT mediante un sistema de pH, conductividad y temperatura, para alimentar un digital twin y modelos de machine learning en las predicciones de la acidez total titulable en niveles de alta precisión operativa.
- Fermentación de café y otras matrices: La combinación de sensores de IoT y transmisión por la nube permite monitorizar parámetros críticos (temperatura, pH, CO_2) durante fermentaciones anaeróbicas del café u de otros productos agrícolas, con la consecuente posibilidad de ajustar el proceso en tiempo real y con impacto directo en la calidad sensorial final.

Tabla 2.3. Variables monitoreadas y tecnologías IoT en fermentación

Variable	**Tipo de sensor**	**Función principal**
pH	Sensor electroquímico	Control de acidez y metabolismo microbiano
Temperatura	Termómetro digital	Ajuste de condiciones óptima para fermentación
CO_2	Sensor infrarrojo	Indicador de actividad fermentativa
Conductividad (EC)	Sensor eléctrico	Relación con acidez total y degradación de sustratos

Fuente: Hamidah et al., (2024)

La Tabla 2.3, muestra las variables fisicoquímicas más importantes que se controlan durante la fermentación, y las tecnologías que se han utilizado, de las tecnologías basadas en las IoT, para su análisis. Las variables fisicoquímicas que permiten monitorizar en tiempo real, el metabolismo microbiano y el proceso de la fermentación, pueden ayudar a controlar las condiciones óptimas de la misma y por ende ayudarían a mejorar la calidad final del producto al igual que la seguridad del mismo.

2.11.2 Plataformas predictivas y control de procesos avanzado

Además de controlar, las plataformas predictivas permiten anticipar el comportamiento del sistema fermentativo teniendo en cuenta datos históricos y datos en tiempo real. Estas plataformas emplean modelos matemáticos; inteligencia artificial (IA); digital twins, o modelos que representan virtualmente los procesos físicos bajo estas condiciones; para simular, optimizar estrategias de control de los procesos fermentativos, incidiendo así de manera importante en minimizar las incertidumbres y garantizar la calidad reproducible de los productos fermentados.

a) Modelos predictivos y gemelos digitales aplicados en fermentación

A través del estado del arte del tema, dicha literatura específica ha señalado que:

- **Gemelos digitales:** La construcción de gemelos digitales para procesos fermentativos como el caso del kombucha permite estimar variables como la concentración de fuente de carbono y crecimiento bacteriano con modelos de regresión y algoritmos genéticos para optimizar estrategias de control del proceso.
- **Machine learning y control predictivo:** En los sistemas de fermentación láctea inteligente (ej. yogur), el uso de modelos de aprendizaje profundo a base de LSTM y redes neuronales, junto con machine learning sirven para poder predecir parámetros claves (pH, sólidos disueltos); además de construir guías de recomendaciones ante ajustes de proceso en tiempo real para lograr homogeneidad en lotes.
- **Reseña de sensores y control:** Reseñas específicas han registrado el estado del arte de los sensores IoT, la reología sensorial y modelos de predicción en fermentaciones comerciales (ej. vino), donde se constatan las distintas posibilidades de integración del IoT y bioprocesos avanzados (Ray et al., 2026).

Tabla 2.4. Tecnologías predictivas y algoritmos aplicados a fermentación

Tecnología	Enfoque principal	Ejemplo de aplicación
Digital twin	Simulación basada en datos	Optimización de fermentación kombucha
Machine learning	Predicción de parámetros	Control de pH en yogur
Redes neuronales	Análisis de patrones no lineales	Gestión dinámica de variables
Algoritmos	Optimización de	Control adaptativo de

genéticos	estrategias	fermentación

Fuente: Ray et al., (2026)

La Tabla 2.4, representa un conjunto de tecnologías emergentes que aplicadas a la fermentación, resaltan su enfoque principal y ejemplos concretos de su uso en la optimización de variables apreciadas como el pH, la dinámica microbiana y la eficiencia en el proceso de fermentación.

2.12 Automatización y digitalización de bioprocesos

La digitalización y automatización de los bioprocesos fermentativos constituyen un pilar de la transformación de la industria alimentaria actual hacia sistemas más eficientes, reproducibles y seguros. Dado que se ha elevado la demanda de productividad y calidad, las tecnologías digitales, como sensores inteligentes, IoT, IA y control automático, ofrecen la posibilidad de gestionar bioprocesos de fermentación complejos basados en datos en tiempo real y en modelos predictivos. Las tecnologías de innovación, además de ayudar a alcanzar los objetivos de rendimiento de los bioprocesos, permiten implementar la trazabilidad y limitar la variabilidad operativa para recorrer el camino de los sistemas alimentarios resilientes y sostenibles.

2.12.1 IA y automatización en bioprocesos

La llegada de la IA junto con el ML y la automatización han transformado el control de los bioprocesos de una forma impactante,

facilitando la toma de decisiones basada en datos y la optimización dinámica de las variables de fermentación más determinantes. Durante este proceso, los sistemas inteligentes son capaces de sobrepasar el clásico control estático en forma de ajustes manuales, pasando a convertirse en plataformas que predicen, reaccionen y corrijan automáticamente las desviaciones operativas, aumentando la eficiencia, reduciendo el desperdicio y asegurando la consistencia de calidad del producto.

a) Aplicaciones recientes en fermentación

Las publicaciones científicas recientes indican que:

IA y aprendizaje profundo aplicados al control de la fermentación láctica: Un sistema de control de la fermentación del yogur a partir de un sistema de control de la fermentación de los productos lácteos constituye un sistema de control que permite monitorizar el proceso de fermentación del yogur a partir de la integración de sensores y de modelos de IA para obtener pH, temperatura, conductividad y sólidos disueltos y mediante el uso de redes neuronales profundas, como las LSTM y las redes neuronales Feed Forward Neural Network (FFNNs), para predecir la trayectoria y la evolución del proceso, sugiriendo al final un conjunto de parámetros de control automático, logrando así mejorar la reproducibilidad y reducir la variabilidad del producto (Ray et al., 2026b).

Análisis cuantitativo mediante visión por computadora: Modelos de machine Learning aplicados a las imágenes generadas durante la

fermentación que permiten obtener automáticamente la cuantificación de los niveles de actividad fermentativa a partir del procesamiento de burbujas y otros tipos de señales visuales, integrando el análisis de imagen como herramienta de medida continua del estado del proceso (Jeong & Kim, 2024) .

Estas aplicaciones son ejemplos concretos que muestran cómo los bioprocesos se benefician de la automatización para optimizar el resultado, reducir el tiempo y asegurar la repetibilidad.

2.12.2 Plataformas digitales, gemelos digitales y control predictivo

Los gemelos digitales y las plataformas de control predictivo son métodos novedosos de digitalización que favorecen la simulación, la monitorización y la optimización de bioprocesos fermentativos. Distinta de la automatización tradicional que sólo hace uso de reglas, aquí se incorporan modelos matemáticos, datos en tiempo real (mejorados con históricos), y algoritmos optimizados para realizar predicciones de cómo será el comportamiento del proceso, reduciendo atisbos de incertidumbres, así como para la toma de decisiones en tiempo real en el control del proceso sin los requerimientos de los humanos en el lazo de control.

a) Aplicaciones de los gemelos digitales

Gemelos digitales aplicados a la fermentación de la kombucha: En los trabajos más recientes se evidencian entrevistas de gemelos digitales aplicados a la fermentación de kombucha que estiman

variables como la concentración de las bacterias y el consumo de fuente de carbono a partir de datos de IoT, aplicando además algoritmos de predicción y de optimización mediante redes PLS y algoritmos genéticos para controlar el sistema fermentativo de forma muy avanzada (Zhao et al., 2025).

Este tipo de tipo de sistema ofrecen robustez en el control del proceso, ya que permite validar estrategias de operación en entornos simulados y virtuales, antes de su aplicación física, aun evitando los costes y el riesgo de las fallas operativas.

2.12.3 Integración de Internet de las Cosas (IoT), Sensores y Sistemas de control Automatizados

La utilización de sensores inteligentes conectados a través de Internet de las Cosas (IoT) permiten la determinación continua de parámetros críticos (pH, temperatura, concentración de metabolitos, actividad microbiana) en la fermentación. La combinación de IoT y sistemas de control automatizado que incorporan algoritmos de Machine Learning (ML), no solo promueve el monitoreo, sino también la acción automatizada sobre las condiciones del proceso de fermentación en tanto que se pueda operar dentro de los parámetros objetivos, evitando una intervención manual continua.

a) Evidencia reciente

Las tecnologías de sensores conectados o biosensores conectados mediante IoT favorecen la determinación continua de las condiciones

fermentativas pudiendo promover ajustes automáticos en tiempo real en las condiciones del proceso, minimizando la dependencia de muestreos iterativos y mejorando la eficiencia del proceso.

La literatura señala plataformas donde IoT, sensores y AI se integran para automatizar los parámetros críticos, resultando básicas para la viabilidad industrial de las fermentaciones tradicionales y de precisión.

2.13 Evaluación de la inocuidad en sistemas fermentativos

La verificación de la inocuidad en sistemas de fermentación constituye una línea central en la seguridad alimentaria contemporánea, dado que este proceso implica la actividad metabólica activa de microorganismos vivos y también la transformación bioquímica de matrices alimentarias complejas que ellos habitan e invaden. La fermentación se ha utilizado como una forma de conservación de los alimentos y de mejora de las propiedades nutricionales de los mismos desde mucho tiempo atrás. Sin embargo, la industrialización de la fermentación y la incorporación de biotecnologías modernas legitiman la obviedad de la implementación de esquemas de control sanitario muy estrictos. En este sentido, la unión de los caminos reguladores y de los caminos técnicos permites garantizar que los alimentos fermentados sean inocuos desde el punto de vista microbiológico, químico y físico y evitar riesgos de salud pública y confianza que puede dar el consumidor.

2.13.1 Enfoque regulador de la inocuidad

Los marcos regulatorios nacionales e internacionales para los productos alimentarios fermentados establecen los principios y requisitos mínimos de inocuidad a lo largo de toda la cadena productiva. Dichos marcos regulatorios se sustentan en evaluaciones de riesgo científico, requisitos aprobados a partir de normas microbiológicas, o mediante sistemas de gestión de la inocuidad, como el Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (APPCC/HACCP). En los últimos 5 años las agencias regulatorias han actualizado sus líneas de trabajo para incorporar la fermentación de precisión, la biología sintética y las nuevas tecnologías en fermentación.

a) Normativas internacionales y guías técnicas

Agencias reguladoras tradicionales, como la FDA, la EFSA, la FAO/OMS y el Codex Alimentarius, han adaptado y reforzado sus marcos regulatorios de productos fermentados enfatizando:

Identificación de peligros biológicos: Salmonella spp., Listeria monocytogenes, E. coli O157:H7.

Control de metabolitos no deseados (aminas biógenas, micotoxinas, etanol residual).

Evaluación de cepas microbianas bajo estatus GRAS (Generally Recognized As Safe) o QPS (Qualified Presumption of Safety).

Asimismo, una revisión contemporánea de la literatura científica define que los marcos regulatorios actuales enfatizan la validación

científica de las cepas fermentativas y el control de los metabolitos no deseados emergentes, viéndose especialmente actualizados en alimentos novedosos (Sivixay et al., 2021).

La EFSA ha reforzado el enfoque del estatus QPS de los microorganismos de fermentación alimentaria para la evaluación de genómica, resistencia a antimicrobianos y producción de toxinas (Lambré et al., 2023).

2.13.2 Estudio microbiológico de la inocuidad

El estudio microbiológico supone un componente técnico básico que permite conseguir la inocuidad de los sistemas fermentativos, basado en la detección, cuantificación y caracterización de aquellos microorganismos patógenos, alterantes o bien de los indicadores sanitarios que pueden ir apareciendo durante el proceso fermentativo. Con el avance de las técnicas moleculares se ha conseguido mejorar tanto la sensibilidad como la especificidad y la rapidez de los análisis.

a) Métodos tradicionales y avanzados

Los métodos empleados incluyen:

- Recuento en placa (UFC/g).
- Pruebas de presencia/ausencia.
- PCR y qPCR.
- Secuenciación metagenómica (NGS).

2.13.3 Control de los peligros químicos y metabolitos indeseables

Pueden aparecer compuestos químicos con propiedades potencialmente peligrosas, dando lugar a la creación de aminas biógenas, de etanol residual, de aldehídos, de toxinas microbianas, etc. La evaluación de los peligros en la elaboración del alimento es esencial, ya que es la única forma de reducir la posibilidad de sufrir efectos indeseables en la salud del consumidor, en el caso de aquellos colectivos vulnerables.

a) Evidencia científica reciente

Los estudios han demostrado que:

- Las aminas biógenas (histamina, tiramina) se pueden acumular en el caso de fermentaciones mal controladas.
- El control de pH, de temperatura y de cepas, disminuirá significativamente estos peligros (Dankar et al., 2025).

2.13.4 Sistemas APPCC (HACCP) aplicados a fermentación

El sistema APPCC es la herramienta preventiva más usada para garantizar la inocuidad en procesos fermentativos industriales y artesanales, que a través de su aplicación puede detectar aquellos puntos críticos donde pueden aparecer peligros y a su vez confirmar establecer medidas de control de carácter verificable.

a) Aplicación en sistemas fermentativos

Estudios recientes sugieren que la integración de APPCC con sensores digitales produce una menor variabilidad en los procesos en comparación con la medición manual de señales de control (Ma & Johnson, 2021).

2.13.5 Transición de enfoques normativos y técnicos

La inocuidad en sistemas fermentativos contemporáneos se favorece por la transición entre las normativas y las herramientas técnicas avanzadas; esto permite tanto asegurar la normativa vigente como anticipar los riesgos emergentes que se asocian con fermentaciones de precisión y biotecnología avanzada como se evidencia en la Tabla 2.5:

Tabla 2.5. Integración regulatoria–técnica en fermentación

Componente	**Enfoque regulatorio**	**Enfoque técnico**
Microorganismos	QPS / GRAS	Secuenciación genómica
Patógenos	Límites legales	PCR, qPCR
Metabolitos	Límites Codex	HPLC, GC-MS
Procesos	APPCC obligatorio	Sensores IoT
Trazabilidad	Auditorías	Blockchain

Fuente Ma & Johnson, (2021)

2.14 Aplicaciones industriales en la agroindustria

La fermentación industrial se ha estructurado como una estrategia, hacia la agroindustria, moderna, y es por su habilidad de transformar las materias primas agrícolas al alimento e ingredientes de alto valor añadido, seguros y sostenibles.

En el contexto actual, caracterizado por la presión sobre los sistemas productivos tradicionales, la fermentación se cristaliza en una solución tecnológica que permite mitigar la contaminación, optimizar la satisfacción de los recursos y contribuir a la seguridad alimentaria global. La aplicación de los principios de biotecnología, biofísica y automatización han servido para escalar de manera eficiente y convenientemente los procesos, a favor de la industrialización.

2.14.1 Infraestructura industrial para bioprocesos fermentativos

La infraestructura industrial dedicada a la fermentación ha tenido una evolución dramática en los últimos años en la dirección de sistemas muy controlados, automatizados y escalables. Este proceso es resultado de la necesidad de tener condiciones fisicoquímicas equilibradas para asegurar la seguridad microbiológica y la reproducibilidad del proceso de fermentación.

De igual forma, las instalaciones industriales actuales cuentan con biorreactores de gran volumen, equipados con sistemas automatizados de control del pH, de la temperatura, del oxígeno disuelto y del agitado. Dichos sistemas se desarrollan a partir de los principios básico-biofísicos de la transferencia de masa y de energía que afectan a la cinética microbiana y al rendimiento del proceso. La optimización de cada uno de estos parámetros realizados permite llevar a cabo fermentaciones con altas densidades celulares y de este modo disminuir el tiempo del proceso y elevar su rendimiento.

Adicionalmente estudios recientes muestran que un buen diseño de la infraestructura fermentativa es clave para evitar riesgos de contaminación cruzada, también para asegurar la inocuidad del producto final, especialmente en fermentaciones que se establecen en alimentos funcionales y proteínas alternativas (Sepulveda et al., 2024).

Con el fin de responder a la exigencia de comparar de forma explícita el rendimiento de los procesos fermentativos antes de la incorporación de la biotecnología y automatización, la Tabla 2.6, resume las principales diferencias de operación entre la fermentación tradicional/espontánea y el bioproceso controlado o por precisión.

Tabla 2.6. Comparación cualitativa entre fermentación tradicional y bioprocesos controlados en la industria alimentaria

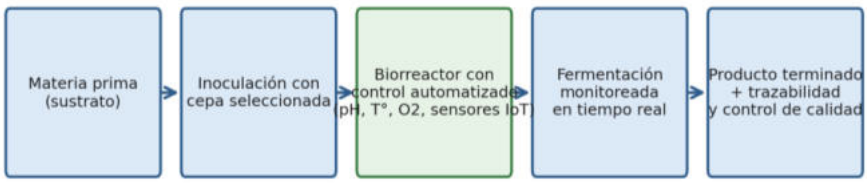
Parámetro	**Fermentación tradicional / espontánea**	**Bioproceso controlado / de precisión**
Reproducibilidad del proceso	Baja, dependiente de la microbiota ambiental	Alta, mediante cepas seleccionadas y control de variables
Riesgo de contaminación cruzada	Mayor, sin barreras tecnológicas activas	Menor, mitigado por control automatizado de pH, O2 y temperatura
Trazabilidad y control de calidad	Limitada, basada en criterios sensoriales	Alta, apoyada en sensores IoT y registro digital continuo
Duración del proceso	Variable e impredecible	Optimizada y más predecible
Escalabilidad industrial	Limitada	Alta, apta para plantas de gran volumen

Inversión inicial requerida	Baja	Alta (biorreactores, automatización, personal especializado)

Fuente: Elaboración propia a partir de Sepulveda et al. (2024) y Luo & Koksel (2023)

De la misma forma en que complementamos la anterior comparación con un elemento visual, la Figura 2.1, esquematiza el flujo tecnológico de un bioproceso de fermentación controlada.

Figura 2.1. Esquema del bioproceso de fermentación controlada en la agroindustria, en contraste con la fermentación espontánea



2.14.2 Producción de proteínas alternativas a través de fermentación

La producción de proteínas alternativas por fermentación es uno de los hitos más relevantes de la agroindustria moderna, puesto que sugiere una alternativa sostenible a las proteínas de los animales. Este concepto de producción se basa en el crecimiento controlado de microorganismos o en la producción dirigida de proteínas concretas por fermentación de precisión.

Los procesos fermentativos aplicados a proteínas alternativas trabajan con hongos filamentosos, levaduras o bacterias capaces de sintetizar biomasa rica en proteínas o proteínas particulares con determinados perfiles nutricionales. Desde la óptica biofísica, el control de la tasa de crecimiento, la disponibilidad de nutrientes o la transferencia de oxígeno es básico para maximizar la eficiencia metabólica.

La bibliografía científica indica que estos sistemas son capaces de aumentar la producción de proteína utilizable entre un 20% y un 50%, a la vez que se mejora la digestibilidad y el perfil de los aminoácidos esenciales. Por otro lado, la fermentación permite reducir la presencia de antinutrientes presentes en las materias primas vegetales, lo cual permite mejorar el valor nutricional del producto final (Luo & Koksel, 2023).

2.14.3 Producción de lípidos y compuestos de funcionalidad

La fermentación industrial también ha sido otra de las vías eficientes para la producción de lípidos, de ácidos grasos de funcionalidad y de otros metabolitos alimentarios. Esta aplicación es relevante en la consecución de sustitutos de aceites vegetales de gran impacto ambiental y de grasas animales.

Levaduras oleaginosas y microalgas son los agentes biológicos para la producción de lípidos mediante fermentación controlada que permite la obtención de altos niveles de acumulación intracelular. La modificación de parámetros como la relación carbono/nitrógeno y la

temperatura y la oxigenación, dirigen el flujo metabólico de las fermentaciones hacia la producción lipídica.

Desde la perspectiva biofísica, la estabilidad del sistema fermentativo es dependiente de la gestión del estrés oxidativo y de la eficiencia en la transferencia de oxígeno, factores definitorios en la fermentación aeróbica. Investigaciones recientes indican que son viables a escala industrial y que presentan importantes ventajas ambientales (Luo & Koksel, 2023).

En este contexto, la Tabla 2.7, presenta las principales aplicaciones industriales de la fermentación, destacando los microorganismos empleados, los productos obtenidos y los beneficios asociados a cada proceso.

Tabla 2.7. Principales aplicaciones industriales de la fermentación

Aplicación	**Microorganismo**	**Producto**	**Beneficio**
Proteínas alternativas	Hongos filamentosos	Biomasa proteica	Alta sostenibilidad
Fermentación de precisión	Levaduras modificadas	Proteínas específicas	Alta eficiencia
Producción de lípidos	Levaduras oleaginosas	Grasas funcionales	Menor impacto ambiental

Fuente: Luo & Koksel, (2023)

2.15 Innovación y perspectivas futuras en fermentación alimentaria

La fermentación de los alimentos ha entrado en un proceso de rápida transformación bajo la influencia de los desarrollos en biotecnología, biofísica aplicada, digitalización e inteligencia artificial. No se queda en procesos clásicos de conservación, sino que la fermentación actual se perfila como un elemento clave en el diseño de sistemas alimentarios más seguros, más orientados hacia la sostenibilidad y más resilientes. En este contexto, la innovación no solamente se muestra en nuevos desarrollos tecnológicos, sino que también en el cruce de enfoques y disciplinas para entender y poder controlar la complejidad de los sistemas biológicos que intervienen. El futuro depara fermentaciones más eficientes, más previsibles y más alineadas con las problemáticas globales de seguridad alimentaria y sostenibilidad ambiental.

2.15.1 Fermentación de precisión y biología sintética

La fermentación de precisión representa uno de los avances tecnológicos más disruptivos que podemos encontrar en la biotecnología alimentaria moderna. Este enfoque, que consiste en el uso de microorganismos diseñados con herramientas de biología sintética para producir compuestos específicos (proteínas, enzimas, lípidos y metabolitos funcionales) con un elevado grado de pureza, reproducibilidad y control en su producción, es relevante desde la óptica de la posibilidad de desacoplar la producción de alimentos de sistemas agrícolas o ganaderos convencionales e intensivos con un menor impacto ambiental asociado a su producción.

La aplicación de técnicas de edición génica (sistemas CRISPR-Cas) han facilitado la modificación de rutas metabólicas microbianas en niveles de precisión nunca antes logrados. Todo permite la sobreexpresión de genes clave, la eliminación de vías metabólicas competidoras y la optimización del flujo metabólico hacia productos de interés alimentario.

Desde la biofísica, la estabilidad de estos sistemas dependerá del control sobre variables como el pH, la temperatura, el potencial redox o la disponibilidad de sustratos/a/eos, factores que sudirectamente con la regulación génica y la actividad enzimática. Diferentes estudios apuntan considerablemente a que la fermentación de precisión permite conseguir rendimientos sensiblemente superiores a los de procesos fermentativos convencionales, aportando, además, a la reducción de la variabilidad del producto final. Esta variabilidad es especialmente relevante para garantizar el cumplimiento de exigencias regulatorias y la inocuidad de productos innovadores. Desde esa perspectiva, la fermentación de precisión se ubicará como un enfoque fundamental para la producción de ingredientes funcionales personalizados, permitiendo, así, abrir focos de trabajo sobre la nutrición de precisión o la formulación de alimentos adaptados a necesidades específicas (Cell Editorial Team, 2024).

2.15.2 Inteligencia artificial, modelado predictivo y Biofísica del proceso

La aplicación de inteligencia artificial (IA) y de modelado predictivo para procesos fermentativos ha cambiado nuestra manera de diseñar, controlar y optimizar los sistemas fermentativos al establecer toda una serie de procedimientos que analizan las grandes cantidades de datos generadas durante la fermentación para que se transformen en decisiones claras, precisas y fundadas en la evidencia científica.

Los modelos de machine learning permiten englobar los datos obtenidos de los sensores fisicoquímicos, análisis microbiológicos y de parámetros operativos, para poder predecir el comportamiento del sistema fermentativo en tiempo real. Desde un enfoque biofísico, estos modelos simplifican la comprensión de toda la dinámica no lineal que muestran los procesos biológicos, así como también posibilitan el estudio de fenómenos tan importantes como la transferencia de masa, la cinética enzimática, que las células poseen, o la respuesta de la célula frente a un estrés ambiental.

La reciente literatura afirma que la combinación de IA con modelos mecanísticos permite anticipar desvíos del proceso antes de comprometer la calidad o la inocuidad del producto. Esta capacidad predictiva nos permite limitar las pérdidas, optimizar la utilización de recursos y mejorar la reproducibilidad industrial; en consecuencia, reitera a la fermentación como un proceso enormemente controlable (Cell Editorial Team, 2024).

Por otra parte, los gemelos digitales permiten someter situaciones operativas complicadas a simulación para examinar como cambiaría las condiciones de proceso sin la necesidad de tratar el sistema físico.

2.15.3 Innovación orientada a la sostenibilidad y economía circular

La sostenibilidad se ha convertido en el centro de la innovación en fermentación en el ámbito alimentario. Las perspectivas futuras ponen especial énfasis en un desarrollo de procesos que minimicen el impacto medioambiental, reduzcan el desperdicio y optimicen los modelos de economía circular en la agroindustria.

La fermentación permite dar valor a subproductos o residuos agrícolas como sustratos fermentativos, convirtiéndolos en ingredientes ricos en valor nutricional; de esta forma se reduce la presión sobre los recursos naturales y se evita la generación de desechos, contribuyendo, así, a sistemas alimentarios más eficientes y resilientes (Luo & Koksel, 2023).

Desde un punto de vista biofísico, la optimización de estos procesos requiere una mejor comprensión de los mecanismos de interacción entre el microorganismo y los sustratos complejos, así como de los límites termodinámicos del sistema. Estudios recientes demuestran que la fermentación integrada en modelos de economía circular puede llegar a reducir de forma significativa la huella de carbono de la producción alimentaria al tiempo que se mejora la seguridad alimentaria global.

2.15.4 Perspectivas futuras y retos emergentes

A pesar de los logros obtenidos, la fermentación de alimentos debe enfrentar todavía algunos retos técnicos, regulatorios y sociales que limitarán su futuro. La superación de estos retos determinará, en gran medida, su aceptabilidad a escala mundial.

Los retos fundamentales se centran en la escalabilidad de los procesos innovadores, la aceptación de los consumidores o la armonización de los marcos regulatorios de productos alimenticios basados en fermentaciones avanzadas. Desde el punto de vista técnico, la estabilidad genética de las cepas modificadas y el control del proceso a escala industrial son ámbitos de investigación activa.

Esos desafíos son más acuciantes en el ámbito de la pequeña y mediana agroindustria, dado que el coste de la automatización, de los biorreactores de precisión y de la validación regulatoria puede ser mejorado más allá de la capacidad de inversión disponible, y, por tanto, se produce una brecha tecnológica ante la gran industria. Por tanto, aparecen, en una literatura más reciente, recomendaciones acerca de la obligación de evaluar cada innovación no solo en términos de rendimiento biotecnológico, sino también mediante estudios de coste-beneficio y estudios de impacto ambiental que comparen explícitamente el resultado de la actividad antes y después de la implementación de la innovación de manera que la inclusión de dichas tecnologías conteste a criterios de viabilidad económica y no solo a la

atracción de lo que puede aportar una nueva herramienta tecnológica (Sepulveda et al., 2024).

Lo que es indudable son los buenos augurios a futuro. La interferencia entre biotecnología, biofísica e inteligencia artificial tienen el horizonte de la fermentación como el instrumento que ayude a confrontar los retos alimentarios del siglo XXI, con soluciones científicas que permitan generar alimentos saludables, sostenibles y asequibles.

Capítulo III

3 Radiaciones como herramientas biotecnológicas y biofísicas para garantizar alimentos seguros

En los últimos años, la utilización de radiaciones en los sistemas alimentarios se ha consolidado como una estrategia científica y tecnológica importante para garantizar la seguridad, ampliar la vida útil y preservar la calidad de los alimentos. Desde la aproximación biofísica y biotecnológica, las radiaciones —ionizantes y no ionizantes— permiten el control de microorganismos patógenos, la reducción de las mermas post-cosecha y servir como complemento a métodos tradicionales de conservación. En el marco actual de globalización, cambio climático y demandantes de alimentos seguros, esta tecnología se ha visto igualmente favorecida por el interés científico durante este último lustro.

3.1 Fundamentos biofísicos de las radiaciones

Desde una perspectiva biofísica, las radiaciones son formas de energía que se relacionan con la materia viva a nivel atómico y molecular, interacciones que determinan la funcionalidad, estabilidad y disposición de los componentes biológicos constitutivos de los alimentos y los microorganismos en ellos.

3.1.1 Naturaleza y energía de las radiaciones

La radiación se comporta físicamente en función de su energía por fotón o partícula.

Las radiaciones se clasifican según la energía que tienen en:

Ionizantes: poseen energía suficiente para arrancar electrones de los átomos generando así iones, abarcando los rayos gamma, los rayos X y los haces de electrones acelerados.

No ionizantes: no producen ionización directamente pero sí excitación de las moléculas causando modificaciones físicas o fotoquímicas (UV, microondas, radiofrecuencias).

Desde un enfoque biofísico, esta diferencia energética es importante ya que las ionizantes interaccionan de forma directa (con una energía suficiente para romper enlaces químicos) e indirecta (formación de radicales libres a partir de agua). Las no ionizantes sólo lo hacen principalmente mediante excitación molecular y efectos térmico o dielectro-físicos.

3.1.2 Mecanismos de interacción

La biofísica de la irradiación de los alimentos se basa en dos mecanismos de interacción:

Interacción directa con las biomoléculas: La radiación ionizante puede provocar rupturas de enlaces covalentes en las moléculas biológicas (ej. DNA, proteínas, lípidos). Esto es debido a impactos energéticos que rompen los electrones y desestabilizan estructuras.

Interacción indirecta por mediación del agua: Dado que los alimentos son altamente acuosos, la radiólisis del agua es fundamental:

- La radiación ionizante puede romper moléculas de agua que generaran radicales hidroxilos (•OH), radicales de hidrógeno (•H) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2); dichos radicales son muy reactivos y podrán generar daños oxidativos en células y componentes biológicos (Zanardi et al., 2020).

Estas reacciones son vitales para comprender el por qué la irradiación es efectiva contra los microorganismos patógenos y el por qué dicha tecnología puede revertir determinadas características moleculares en los alimentos sin que estos sean radiactivos.

3.1.3 Los efectos físico-químicos en biomoléculas

Proteínas: La radiación puede promover oxidación de aminoácidos, la ruptura de enlaces peptídicos, cambios conformacionales y agregación molecular dependiendo de la dosis y las condiciones ambientales.

Lípidos: Especialmente susceptibles a la peroxidación lipídica, que dará lugar a la formación de compuestos secundarios que alterarán en cierta medida la calidad sensorial.

Carbohidratos: Aunque relativamente más estables, pueden experimentar fragmentación o cambios de forma cristalina dependiendo de la dosis aplicada.

La biofísica de estas interacciones implica la existencia de un equilibrio entre la eficacia microbiana (inactivación) y los efectos químicos que pueden tener lugar y que alterarán en gran medida el alimento (Fallah et al., 2023). Este equilibrio requiere un diseño experimental y dosis ajustadas.

3.2 Clasificación de las radiaciones aplicadas a alimentos

El grado de ionización y el tipo de efecto que estas radiaciones provocan en los alimentos y los microorganismos determinan la clasificación de las radiaciones con aplicación alimentaria. A continuación, se expone una clasificación función-académica.

3.2.1 Radiaciones ionizantes

Las radiaciones ionizantes poseen suficiente energía para producir ionización directa y esta es precisamente la que se utiliza en la irradiación de los alimentos. Ellas son:

a) Rayos gamma (γ-rays)

- Emisión de radionúclidos tales como el Cobalto-60 (^{60}Co) y el Cesio-137 (^{137}Cs).
- Gran penetración en sólidos y en productos densos.
- Son muy eficaces para la inactivación microbiana profunda.

b) Rayos X

- Son generados a partir de aceleradores electrónicos que inciden sobre blancos metálicos.

- Su uso permite el tratamiento de lotes sellados y controlados sin material radiactivo fuente.

c) Haz de electrones acelerados (e-beam)

- Son producidos por aceleradores electrones de alta energía.
- Son ideales para tratamientos rápidos y superficiales o bien de productos con espesores limitados.

Importancia práctica: Las radiaciones ionizantes, son aprobadas por organismos internacionales para la irradiación de alimentos porque no inducen radioactividad en los mismos y son compatibles con las normas exigidas en inocuidad alimentaria.

3.2.2 Radiaciones no ionizantes

Las radiaciones no ionizantes no generan ionización de forma directa, pero su uso en los alimentos sí es importante cuando se utilizan para procesos de esterilización de la superficie, pasteurización no térmica y modificación funcional.

a) Radiación UV-C

- Se emplea con la finalidad de realizar la desinfección de la superficie de productos, superficies y líquidos.
- Principalmente, su modo de acción se desarrolla dentro del ámbito físico mediante una excitación electrónica que conlleva la formación de dímeros de timina en el ADN de los microorganismos.

b) Microondas y radiofrecuencia

- Conducen a efectos de calentamiento volumétrico o excitación molecular que pueden hacer posible o facilitar la inactivación de los microorganismos o la mejora de los procesos tecnológicos (p. ej., pasteurización).

c) Luz pulsada (PL)

- Altas intensidades de luz en breves pulsos que pueden afectar las estructuras celulares superficiales. Se pueden utilizar en combinación con técnicas de conservación no térmica o sumadas a los métodos tradicionales (Shafi et al., 2025).

3.3 Interacción de la radiación con los componentes del alimento

La interacción de radiaciones con los alimentos depende de la naturaleza del alimento (contenido de agua; macromoléculas; estructura física...) y del tipo de radiación aplicado. A continuación, se describen los efectos sobre los principales componentes en base a evidencia científica actualizada.

3.3.1 Agua

De hecho, el agua, como el principal elemento constitutivo de los alimentos frescos, puede influir en su interacción con la radiación:

- El proceso de la radiólisis origina radicales libres que producen la gran mayoría de los daños en los microorganismos y, por tanto, las alteraciones químicas que sufren los alimentos en su matriz.

- El oxígeno presente puede también alterar las proporciones de radicales generados, y así, afectar tanto a la eficacia antimicrobiana como a la estabilidad de los nutrientes.

3.3.2 Proteínas

Los trabajos recientes que han investigado alimentos con gran cantidad en proteína han concluido en rescatar que:

- La irradiación puede dar lugar a desnaturalización parcial, agregación o fragmentación de proteínas, dependiendo de la dosis y del tipo de radiación.
- En los productos cárnicos y derivados, los cambios en las proteínas sarcoplásmica y miofibrilares pueden dar lugar a modificaciones en la solubilidad, color y textura del producto.

3.3.3 Lípidos

Los lípidos son sensibles a procesos oxidativos provocados por radicales:

- La radiación ionizante puede provocar el incremento de la peroxidación de ácidos grasos insaturados que pueden generar compuestos secundarios que pueden influir sobre el sabor y la rancidez.
- Los efectos de la combinación con envases activos o antioxidantes pueden disminuir estos efectos.

3.3.4 Carbohidratos

Los carbohidratos son más estables químicamente con respecto a la radiación; no obstante:

- Pueden provocar cambios superficiales o ligera fragmentación en las formas estructurales como almidones.
- Normalmente, los efectos de la radiación de tipo regulado sobre los carbohidratos son más escasos que en los propios lípidos o en las proteínas.

3.4 Efectos de la radiación sobre microorganismos patógenos

La acción de las radiaciones sobre microorganismos patógenos es uno de los pilares científicos más firmes que sustentan su uso en la seguridad alimentaria. Desde un enfoque biofísico-microbiológico avanzado, la irradiación provoca, en diferentes estructuras celulares, daños irreversibles, lo cual causa la inactivación de los microorganismos y la pérdida de capacidad reproductora.

3.4.1 Mecanismos biofísicos de la inactivación microbiana

La radiación ionizante opera a través de dos mecanismos de inactivación microbiana complementarios descritos ampliamente en la literatura más reciente.

a) Acción directa sobre el material genético

La energía de la radicación se comporta como un inductor directo del daño en el ADN y el ARN microbiano, inducido rupturas de cadenas simples y dobles, modificaciones oxidativas de bases nitrogenadas y enlaces cruzados ADN–proteína que bloquean la replicación y transcripción del material genético, lo cual desencadena muerte celular o incapacidad reproductiva (Ibrahim et al., 2023).

b) Acción indirecta mediado por radicales libres

La radiación ionizante induce la radiólisis del agua intracelular y forma radicales altamente reactivos como OH, O_2^- y H_2O_2, los cuales oxidan los lípidos de membrana, desnaturalizan proteínas enzimáticas y dañan los ácidos nucleicos (Stefas et al., 2022).

3.4.2 Diferencial de sensibilidad de los microorganismos patógenos

La resistencia a la radiación depende de la morfología celular, de la eficacia de los mecanismos de reparación del ADN y del estado fisiológico del microorganismo. Según trabajos recientes, es posible establecer el siguiente orden generalizado de este tipo de resistencia:

Virus < Bacterias Gram negativas < Bacterias Gram positivas < Hongos < Esporas bacterianas.

Patógenos de elevada importancia sanitaria *como Salmonella spp, Listeria monocytogenes* y *Escherichia coli* O157:H7 evidencian caídas logarítmicas importantes con dosis comprendidas entre 1-5 kGy, dependiendo del alimento tratado (Wang et al., 2022).

La Tabla 3.1, se reduce la carga microbiana provocada por el tratamiento que fue evidenciado en la mayoría de los alimentos, que incluye microorganismos patógenos de importancia para la seguridad alimentaria. En esta tabla se muestran microorganismos patógenos que sí susceptible a matrices alimentarias concretas, las respuestas de inactivación que logra la radiación ionizante, la dosis que fue aplicada para conseguir la inactivación y, por último, la reducción microbiana conseguida expresada en números logarítmicos. Esta información también nos permitía inferir la eficacia de la irradiación como técnica de control microbiano y de reducción de riesgos sanitarios de alimentos aptos para el consumo.

Tabla 3.1. Reducción microbiana inducida por irradiación en alimentos específicos

Microorganismo patógeno	**Tipo de alimento asociado**	**Mecanismo principal de inactivación**	**Dosis efectiva (kGy)**	**Reducción microbiana**
Salmonella enterica	Carne aviar, especias	Daño directo al ADN y radicales libres	1.0 – 3.0	4–6 log CFU/g
Escherichia coli O157:H7	Carne molida, vegetales frescos	Ruptura de doble hebra del ADN	0.5 – 2.0	3–5 log CFU/g
Listeria monocytogenes	Lácteos, productos listos para consumo	Alteración de membrana y	1.0 – 2.5	3–5 log CFU/g

Fuente: Wang et al., (2022)

3.4.3 Implicaciones en salud pública

Las pruebas científicas demuestran que la irradiación convierte en un factor decisivo la disminución de la incidencia de las enfermedades transmitidas por los alimentos constituyéndose así en un recurso de primera magnitud dentro de los sistemas modernos de prevención del riesgo microbiológico (Lambré, Barat Baviera, et al., 2022).

3.5 Irradiación de alimentos como método de conservación

La irradiación de alimentos es una posible tecnología de conservación no térmica bien conocida, cuyo objetivo principal es mantener la vida útil, la reducción de la carga microbiana y el mantenimiento de la calidad del producto al mismo tiempo que asegura la inocuidad del producto.

3.5.1 Fundamentos tecnológicos y niveles de dosis

La energía absorbida en todo el proceso se expresa en Gray (Gy) y de acuerdo con el objetivo tecnológico al que queramos llegar pueden utilizarse diferentes niveles de dosis:

0,05-0,15 kGy: Inhibición de brotación

0,3-1 kGy: Desinsectación y retraso de maduración

1-3 kGy: Disminución de patógenos

3-10 kGy: Esterilización comercial

3.5.2 Aplicaciones prácticas en alimentos

La irradiación de los alimentos ha sido considerada una tecnología válida y aceptada para el control microbiológico de los productos alimenticios y para la conservación de los productos agrícolas sin merma sensible de las propiedades sensoriales y nutritivas de los alimentos. La aplicación de la irradiación está condicionada por el alimento, el objetivo tecnológico que se pretende alcanzar y la dosis de radiación, lo cual hace que la eficacia y la seguridad sean determinantes. En este sentido, la Tabla 3.2, que se ofrece más adelante, es un resumen de las principales aplicaciones de la irradiación como método de conservación en los diferentes grupos de alimentos, de la cual se puede ver el objetivo, el tipo de radiación, las dosis y los efectos tecnológicos.

Tabla 3.2. Aplicaciones de la irradiación como método de conservación

Tipo de alimento	**Objetivo de la irradiación**	**Tipo de radiación**	**Dosis aplicada (kGy)**	**Efecto tecnológico**
Carne aviar	Reducción de Salmonella spp.	Rayos gamma (Co-60)	1.0 – 3.0	Disminución de patógenos (4–6 log) y aumento de inocuidad
Carne bovina	Control de E. coli O157:H7	Electrones acelerados	1.5 – 4.5	Inactivación microbiana sin tratamiento térmico
Especias	Descontaminación	Rayos	5.0 – 10.0	Esterilización

secas	microbiana	gamma		comercial y sustitución de fumigantes
Frutas frescas	Retardo de maduración	Rayos X	0.2 – 1.0	Prolongación de vida útil postcosecha
Tubérculos (papa)	Inhibición de brotación	Rayos gamma	0.05 – 0.15	Retraso fisiológico y menor pérdida durante almacenamiento

Fuente: Lambré Barat, et al., (2022)

3.5.3 Beneficios de la irradiación en comparación a las técnicas térmicas clásicas

La irradiación de alimentos ofrece beneficios indudablemente relevantes como alternativa a los procesos térmicos clásicos de preservación (pasteurización, esterilización, escaldado), fundamentalmente a nivel de conservación de la calidad nutricional, sensorial y funcional de los alimentos. A diferencia de los métodos térmicos, la irradiación se trata de una técnica no térmica, dado que la transferencia de energía no se traduce en un aumento significativo de la temperatura del alimento que se desea irradiar.

La mayor conservación de vitaminas sensibles al calor es una de las ventajas más significativas, como son la vitamina C, la vitamina A (retinoides), la vitamina E (tocoferoles), y algunas vitaminas del complejo B. Diversos estudios recientes han demostrado que a dosis tecnológicamente adecuadas ($\leqslant 3$ kGy), la pérdida de vitaminas

ocasionadas por la irradiación son iguales o menores que las generadas por tratamientos térmicos suaves, y bastante más bajas que las producidas por la esterilización térmica convencional (Dymchenko et al., 2023).

Una característica positiva más puede ser la posibilidad de tratar alimentos que ya se encuentren envasados, lo que reduce de manera económica el riesgo de eventual recontaminación posterior al proceso biocida. Este aspecto resulta crítico en primers alimentos que ya se encuentran listos para el consumo, carnes frescas, especias y alimentos mínimamente procesados o de bajo procesamiento, dado que la recontaminación efectuada de nuevo puede ser un foco de riesgo para la salud pública.

Además, la irradiación puede ser una herramienta para disminuir o eliminar el uso de aditivos químicos conservantes, tales como nitritos, sulfitos o alquilaciones, ayudando así a formular alimentos más seguros y acorde a las tendencias actuales de consumo limpio. Los últimos estudios indican que la irradiación puede reemplazar determinados tratamientos químicos en especias o cereales, sin tener que someter a productos a residuos tóxicos o subproductos no deseados.

Desde el punto de vista sensorial, la irradiación aplicada a dentro de unos límites suficientemente controlados nos proporciona estabilidad de color, textura y sabor, en comparación con los procedimientos térmicos que suelen inducir desnaturalizaciones proteicas,

gelatinizaciones de almidones y reacciones de pardeamiento no enzimático. Por ejemplo, en lo que respecta a cárnicos, se ha demostrado que dosis que oscilan entre 1 y 3 kGy no inducen cambios sensoriales evaluables por consumidores entrenados, especialmente en tratamientos llevados a cabo en atmósferas modificadas.

Por último, la irradiación permite ventajas operativas y ambientales, dado que no requiere excesivos consumos energéticos globales y permite reducir el tiempo de procesado permitiendo tratamientos homogéneos en matrices muy densas o complejas que ya presentan problemas de penetración del propio calor (Song et al., 2022).

3.6 Aplicación de radiaciones ionizantes en seguridad alimentaria

La irrupción en la seguridad alimentaria de las radiaciones ionizantes se concibe como una herramienta de carácter asistencial y de tipo corrector, en función de los principios del análisis del riesgo. Este recurso debe ser considerado dado el hecho de que en los sistemas de la seguridad alimentaria permite reducir peligrosistemas biológicos, dando la posibilidad de no alterar en términos de calidad el alimento y su uso puede ser concomitante a sistemas de tipo Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (HACCP) como a procedimientos de tipo barreras múltiples (hurdle technology).

En la actualidad, la irradiación es vista en el marco de la mundialización del mercado alimentario, la proliferación de los alimentos mínimos en las exigencias reguladoras como una tecnología

clave en pro de atenuar la inocuidad desde la producción primaria hasta el consumidor final.

3.6.1 Disminución el riesgo microbiológico

Recientemente, la evidencia científica ha puesto de manifiesto que la irradiación produce una menor carga microbiana de patógenos de interés sanitario, tales como *Salmonella spp., Escherichia coli O157:H7 y Listeria monocytogenes*. Así, las valoraciones epidemiológicas y los estudios sobre brotes de enfermedades alimentarias constatan una importante disminución de la frecuencia de las enfermedades transmitidas por los alimentos (ETA) asociadas a productos tratados por medio de irradiación; la EFSA afirma que la irradiación, aplicada en las dosis de irradiación autorizadas, es capaz de producir reducciones logarítmicas suficientes para disminuir el riesgo de infección, en especial en los alimentos listos para el consumo y los productos derivados de los animales .

Desde un punto de vista biofísico, la reducción de riesgos se justifica, o se puede explicar, por el daño irreversible que se produce en el material genético de los microorganismos y que las rupturas de ADN, que se presentan tras la exposición a la radiación ionizante, no pueden ser reparadas por los patógenos (Lambré et al., 2022).

3.6.2 Integración de tecnologías de barrera

Una de las principales novedades en el uso de radiaciones ionizantes es la integración de este tratamiento con otras tecnologías de

conservación, lo que permite reducir las dosis necesarias y aumentar la eficacia microbiológica; la irradiación combinada con refrigeración, atmósferas modificadas y envases activos forman un sistema de barreras múltiples de gran efectividad.

Por otra parte, componentes recientes indican que la irradiación a dosis moderadas (1–3 kGy) combinada con bajas temperaturas y descenso de oxígeno favorece la inactivación microbiana y reduce los efectos negativos que puede tener sobre lascalidades sensoriales y nutricionales de los alimentos (Song et al., 2022)

Este enfoque es especialmente fiable para los productos cárnicos, las pescas frescas y los alimentos mínimamente procesados, donde la recontaminación posterior es uno de los problemas de salud más importantes.

3.6.3 Evaluación científica de la seguridad

La seguridad de los alimentos tratados por la irradiación ha sido exhaustivamente evaluada, gracias a estudios de tipo toxicológico, nutricional o radiólógicos. La información científica acumulada muestra, de forma coherente, que los alimentos irradiados:

- No presentan radioactividad inducida, puesto que la energía utilizada es muy inferior a la energía necesaria para activar núcleos atómicos.

- No producen compuestos tóxicos en concentraciones significativas en las condiciones que se encuentran en los niveles admitidos.
- Conservan un valor nutrimental aceptable, con pérdidas comparables o menores que las observadas con tratamientos térmicos convencionales.

Los organismos internacionales coinciden con que los cambios químicos que provoca la irradiación son muy parecidos a los cambios químicos que producen otras formas de conservación aceptadas como se muestra en la Tabla 3.3, (Lambré, Barat Baviera, et al., 2022).

Tabla 3.3. Impacto de la irradiación en la seguridad alimentaria

Dimensión	**Evidencia científica**
Inocuidad	Alta reducción de patógenos
Calidad	Cambios mínimos
Seguridad radiológica	Riesgo nulo

Fuente: Lambré Barat, et al., (2022)

3.6.4 Evaluación cuantitativa del riesgo microbiológico

Desde un punto de vista cuantitativo, la irradiación se ha introducido en modelos de Evaluación Cuantitativa del Riesgo Microbiológico (QMRA) proporcionando estimaciones de la reducción de la probabilidad de infección para diferentes escenarios de consumo.

Modelos recientes indican que la aplicación de dosis entre 2 y 4 kGy puede permitir reducir el riesgo de infección por Salmonella spp. y Listeria monocytogenes en más de un 90 %, dependiendo de la matriz alimentaria y condiciones de almacenamiento (Wei et al., 2025).

La Tabla 3.4, muestra un resumen del impacto de la irradiación de alimentos como una de las estrategias para el control microbiológico, analizada mediante el Análisis Cuantitativo del Riesgo Microbiológico (QMRA) y en la que se comparan diferentes patógenos de interés en seguridad alimentaria, los tipos de alimentos donde se encuentran, las dosis de irradiación y la reducción del riesgo sanitaria. A partir de esta información, se puede ver la eficacia de esta tecnología de reducción del riesgo microbiológico de alimentos de origen animal.

Tabla 3.4. Impacto de la irradiación en la reducción del riesgo microbiológico (QMRA)

Patógeno	Alimento	Dosis (kGy)	Reducción estimada del riesgo
Salmonella spp.	Carne aviar	3	>90 %
L. monocytogenes	Pescado	4	>95 %
E. coli O157:H7	Carne molida	2	~85 %

Fuente: Wei et al., (2025)

3.6.5 Limitaciones y consideraciones técnicas

A pesar de las numerosas ventajas proporcionadas, la irradiación está sometida a ciertas limitaciones que deben ser vistas desde la perspectiva científica pero también regulatoria:

- Variabilidad en la sensibilidad microbiana en función de la matriz alimentaria.
- Posible oxidación de los lípidos en los alimentos con elevado contenido en grasa si no se realiza un control de la dosis.
- Consideraciones de la infraestructura especializada muy cara y coste inicial elevado.

3.7 Aplicación de radiaciones no ionizantes en alimentos

Las radiaciones no ionizantes han incrementado su importancia en la ciencia y tecnología de alimentos, constituyéndose como una alternativa o un complemento a las radiaciones ionizantes y a los tratamientos térmicos convencionales en los últimos años. Desde un punto de vista biofísico, estas radiaciones son aquellas que poseen una energía inferior a la que se requiere para producir ionización atómica, pero el suficiente para provocar excitación molecular, efectos fotofísicos y térmicos controlados capaces de alterar microorganismos y estructuras celulares.

La radiación ultravioleta (UV), la luz pulsada, las microondas y la radiofrecuencia constituyen los tipos de radiaciones no ionizantes que han sido especialmente aplicados a los alimentos y que se caracterizan por su escaso impacto sensorial, por ser tecnologías de bajo consumo energético y por tener una creciente aceptación normativa.

3.7.1 Radiación ultravioleta (UV) en seguridad alimentaria

La radiación ultravioleta -en particular, la UV-C (200–280 nm)- es una de las tecnologías no ionizantes más conocidas y usadas en seguridad alimentaria. Su mecanismo de acción se basa en la absorción de energía por los ácidos nucleicos microbianos, que da lugar a la formación de dímeros de timina e inhibe la replicación celular.

Estudios recientes informan que la radiación UV-C permite la descontaminación de superficies de frutas, verduras, carnes y superficies de contacto con alimentos, consiguiendo reducciones de hasta 3–5 log, dependiendo del tiempo de exposición y la intensidad aplicada(Feng, Berton, et al., 2022).

Su principal limitación está en la baja penetración lo que la restringe para el tratamiento de superficies expuestas o líquidos transparentes (por ejemplo, jugos clarificados y agua de proceso).

3.7.2 Luz pulsada de alta intensidad

La luz pulsada consiste en la generación de pulsos breves de luz de espectro (UV–vis–infra) amplio con alta energía instantánea. Su efecto antimicrobiano tiene su origen en el daño fotoquímico del ADN y en efectos fototérmicos situados en la membrana celular.

Recientes estudios indican su eficacia en la inactivación de bacterias, mohos, levaduras en productos frescos y materiales de envasado mediante tiempos de tratamiento muy cortos (de milisegundos) y mínimas alteraciones sensoriales. Esta tecnología se plantea como una

alternativa prometedora para descontaminar superficies y envases especialmente en procesos de líneas de procesamiento continuo.

3.7.3 Microondas y radiofrecuencia

Las microondas y la radiofrecuencia corresponden a las radiaciones no ionizantes que actúan a través de la interacción de los dipolos moleculares, en especial el agua, lo que permite obtener un calentamiento volumétrico rápido y uniforme.

A diferencia del calentamiento convencional, la microondas y la radiofrecuencia permiten obtener una transferencia de energía más eficiente, con lo que se obtienen unos tiempos de proceso reducidos y unos gradientes térmicos mínimos. A través de estudios recientes, se ha encontrado que la inactivación por microondas puede alcanzar valores similares a los alcanzados al realizar la pasteurización térmica, pero conservando mejor la textura y los nutrientes de ciertos alimentos.

La radiofrecuencia, al tener una longitud de onda mayor, tiene una mejor penetración en matrices alimentarias de gran volumen, siendo especialmente útil para los productos cárnicos y los granos.

3.7.4 Distintos efectos en la calidad nutricional y en la aceptabilidad sensorial

Un importante beneficio de las radiaciones no ionizadas lo constituye su escaso impacto sobre la pérdida de calidad nutricional en comparación con largas exposiciones a tratamientos térmicos. Las

vitaminas termosensibles, los fenoles y los compuestos antioxidantes presentan una mayor estabilidad en comparación con los tratamientos térmicos al emplear tecnologías UV-C o luz pulsada, siempre que se mantengan dentro de rangos controlados. En lo que respecta a la aceptabilidad sensorial, varios estudios indican escasos cambios en color, sabor y textura de frutas y hortalizas frescas siempre que se aplique la optimización de las condiciones de proceso (Feng, Berton-Carabin, et al., 2022).

3.7.5 Aplicaciones prácticas en alimentos

El empleo de tecnologías basadas en radiación ha ido adquiriendo mayor relevancia en el sector alimentario, ya que permiten la mejora de la inocuidad, alargar la vida útil y conservar la calidad nutricional y sensorial de los alimentos. Estas tecnologías dan lugar al control microbiano y a la descontaminación superficial o volumétrica sin que sea necesario pretender necesariamente tratamientos térmicos severos, hecho que se convierte en una ventaja significativa frente a los métodos tradicionales de conservación.

En este sentido, se han utilizado diferentes tipos de radiación (radiación ultravioleta (UV-C), luz pulsada, microondas, radiofrecuencias, etc.) con fines tecnológicos específicos que incluyen la reducción de poblaciones microbianas, la pasteurización rápida o la desinfección de superficies y envases. La elección del tipo de radiación y de los parámetros operativos adecuados dependerá del alimento

tratado, del fin tecnológico buscado y de las características físicas del sistema utilizado.

La Tabla 3.5, presenta una síntesis de las aplicaciones prácticas más relevantes de la tecnología de radiación en alimentos, mostrando los tipos de radiación, los productos alimentarios, el fin tecnológico y los parámetros utilizados típicamente en los procesos industriales y experimentales.

Tabla 3.5. Aplicaciones prácticas en alimentos

Tipo de radiación	**Alimento**	**Objetivo tecnológico**	**Parámetros típicos**
UV-C	Frutas frescas	Reducción microbiana superficial	1–5 kJ/m²
Luz pulsada	Envases plásticos	Descontaminación superficial	1–10 pulsos
Microondas	Platos preparados	Pasteurización rápida	2450 MHz
Radiofrecuencia	Granos	Control microbiano	13–40 MHz

Fuente: Feng, Berton-Carabin, et al., (2022)

3.7.6 La integración con las tecnologías de conservación

Tal como mencionamos anteriormente, las radiaciones no ionizantes se asocian con otras tecnologías de conservación (como la refrigeración, las atmósferas modificadas, los tratamientos químicos suaves, etc.) para dar lugar a los sistemas de barreras múltiples que permiten

disminuir la intensidad de cada tratamiento aplicado de forma individual.

Aparece, en la literatura científica más reciente, un amplio acuerdo que establece que la combinación de radiaciones UV o pulsadas con el tratamiento de refrigeración permite establecer una larga vida de los productos alimenticios frescos sin generar modificaciones de sabor ni alteraciones de la calidad del alimento (Parapouli et al., 2020).

3.7.7 Limitaciones y pruebas futuras

Las radiaciones no ionizantes presentan como limitaciones esenciales:

- Tránsitos bajos en matrices opacas (radiación UV y luz pulsada).
- Posibles calentamientos no uniformes en microondas si no hay control del proceso.
- Validación necesaria concreta del alimento.

A pesar de lo anterior, las tendencias actuales son caminos hacia el desarrollo de sistemas híbridos, sensores inteligentes y el control del proceso en tiempo real lo que ampliará su uso en la industria y potenciará el papel en la sostenibilidad de la seguridad alimentaria.

3.8 Impacto de la radiación en la calidad nutricional

La investigación del efecto de la irradiación sobre la calidad nutricional de los alimentos nos lleva a estudiar lo que sucede en el propio alimento, en la interacción energética que hay entre el alimento

y la propia radiación procedente de la fuente de irradiación, a nivel de cambios físicos y químicos en los nutrientes, y otros cambios también inducidos en los otros componentes del alimento a partir generalmente de los que son los nutrientes. Esta investigación nos lleva a poner de relieve que dichos cambios dependen de la dosis absorbida, de la composición del alimento, del contenido en agua, deseo en oxígeno y del estado físico del alimento al inicio del tratamiento.

Definida la irradiación como un procedimiento tecnológico de conservación no térmica, podemos decir que las alteraciones de la calidad nutricional encontramos en diversos mecanismos distintos a los mecanismos que se dan en los procedimientos de conservación basados precisamente en la aplicación de calor.

3.8.1 Principios físico-químicos que subyacen a la modificación nutricional

La radiación ionizante actúa de forma principal sobre las moléculas de agua presentes en los alimentos provocando especies químicas transitorias las cuales, a su vez, provocan las reacciones secundarias de determinados nutrientes en función de la energía que el alimento haya recibido al ser irradiado. Esas reacciones no tienen lugar de un modo muy selectivo. Su magnitud será función proporcional a la energía que se entrega al alimento.

El grado de modificación nutricional vendrá afectado por:

- Dosis aplicada.

- Disponibilidad de oxígeno.
- Movilidad molecular.
- Tiempo de almacenamiento posterior.

3.8.2 Efecto sobre los macronutrientes

a) Proteínas

Las proteínas presentan una buena estabilidad frente a la irradiación a dosis tecnológicas. Los cambios estructurales observados principalmente se limitan a cambios en enlaces secundarios, sin que afecten de una forma importante al valor nutricional ni a la digestibilidad en la forma de aplicación que es habitual.

Estos efectos han sido descritos en estudios experimentales que analizan la estabilidad proteica frente a diferentes tratamientos de conservación (Almisned et al., 2023).

b) Lípidos

Los lípidos están expuestos a reacciones de oxidación inducidas por radiación, en especial en los alimentos graso (abundantes en lípidos). Este tipo de oxidación dependerá de:

- La cantidad de oxígeno presente.
- El grado de insaturación de los ácidos grasos.
- La temperatura de tratamiento.

El control de la atmósfera y la irradiación en estado congelado permiten la reducción de estos efectos.

c) Carbohidratos

Los carbohidratos ofrecen una gran resistencia a la irradiación. Las modificaciones observadas suelen asociarse a alteraciones de menor tamaño estructural que no afectan al aporte energético ni a la funcionalidad nutricional del compuesto en cuestión.

3.8.3 Impacto sobre micronutrientes

Las vitaminas constituyen la fracción de los nutrientes más afectada por la irradiación, en particular aquellas menos estables frente a la oxidación.

- Las vitaminas liposolubles, en cambio, presentan una aceptable estabilidad frente al rango de dosis aplicado durante la conservación de los alimentos.
- Las vitaminas hidrosolubles, como la vitamina C o la tiamina, pueden ver reducidas sus concentraciones en valores intermedios dependiendo de las condiciones del proceso.

Por su parte, los minerales como compuestos inorgánicos no sufren alteraciones estructurales ni pérdidas apreciables tras la aplicación de la irradiación.

3.8.4 Comparativa técnica de tratamientos térmicos

Desde una perspectiva comparativa, la irradiación produce alteraciones nutricionales diferentes a las generadas por los tratamientos térmicos. El calor provoca una desnaturalización irreversiblemente de las proteínas y un cambio térmico de las vitaminas, mientras que la irradiación no eleva significativamente la temperatura del alimento como se evidencia en la Tabla 3.6:

Tabla 3.6. Comparación técnica del impacto nutricional

Componente	**Irradiación**	**Pasteurización**	**Esterilización térmica**
Proteínas	Cambios estructurales leves	Desnaturalización parcial	Desnaturalización marcada
Lípidos	Oxidación controlable	Oxidación moderada	Oxidación elevada
Vitaminas	Pérdidas dependientes de dosis	Pérdidas térmicas	Pérdidas elevadas
Minerales	Sin cambios	Sin cambios	Sin cambios

Fuente: Almisned et al., (2023)

3.8.5 Efectos del estado físico de los alimentos

El estado físico que el alimento tenga en el momento de realizar la irradiación influye de una forma directa en la estabilidad nutricional del mismo:

- En los alimentos que estén congelados, la movilidad molecular reducida restringe las reacciones químicas que puedan llevarse a cabo como reacciones secundarias.
- En los alimentos que estén secos, la disponibilidad reducida de agua minimiza la formación de especies reactivas.
- En los alimentos frescos, será necesaria una optimización cuidadosa de las dosis y de las condiciones ambientales.

3.9 Impacto de la radiación en la calidad sensorial de los alimentos

La calidad sensorial se refiere a una de las formas de aceptación del consumidor y está relacionada con atributos como color, sabor, aroma, textura y apariencia general, entre otros. La influencia de la radiación en los atributos anteriores es el resultado de la interacción de la energía de radiación con los componentes estructurales y químicos del alimento. Por otro lado, también hay que tener en cuenta las variables tecnológicas asociadas al proceso.

A diferencia de los tratamientos térmicos, la irradiación se lleva a cabo sin provocar cambios macroscópicos inmediatos a partir de la aplicación de las dosis que, cuando son utilizadas en rangos tecnológicos apropiados, permiten conservar características sensoriales muy parecidas a las del alimento fresco de partida.

3.9.1 Efecto sobre el color

Los colores de los alimentos son ocasionados por los pigmentos naturales tales como las clorofilas, los carotenoides, las antocianinas y la mioglobina. Por su parte, la irradiación puede dar lugar a pequeñas variaciones en estos compuestos, principalmente asociando procesos de oxidación indirecta.

También se ha indicado en productos cárnicos que dosis importantes de irradiación podrían dar lugar a cambios temporales de coloración, relacionados con transformaciones en los estados de oxidación de la mioglobina, transformaciones que son comparables a las evidenciadas durante la conservación en Refrigeración normal.

Las valoraciones técnicas llevadas a cabo en carnes y vegetales manifiestan que además del oxígeno y de su control, el envase puede llegar a disminuir los cambios de coloración (Yang et al., 2021a).

3.9.2 Efectos sobre el aroma y el sabor

El producto final de la irradiación presenta un significado sensorial que se encuentra en relación con los compuestos volátiles y las reacciones químicas secundarias que tienen lugar. El efecto que puede tener la irradiación en las características de sabor y aroma de los alimentos llega a ser importante, sobre todo a través de:

- Oxidación de lípidos de los alimentos con elevado contenido de grasas.
- Modificación de compuestos aromáticos muy sensibles.
- Formación de compuestos volátiles con baja concentración.

El efecto de una dosis por debajo de 5 kGy no suele tener una gran repercusión en lo sensorial, siendo los cambios incluso inapreciables en algunos casos y no percibidos cuando son examinados por paneles sensoriales bien entrenados. A pesar de ello, la irradiación combinada con almacenamiento refrigerado ha mostrado su capacidad para eliminar los sabores extraños (Yang et al., 2021).

3.9.3 Efecto sobre la textura

La textura depende de la integridad estructural de proteínas, polisacáridos y agua unida.

La irradiación puede inducir:

- Ablandamiento moderado en frutas y hortalizas frescas.
- Modificaciones limitadas en la firmeza de carnes y pescado.
- Alteraciones despreciables en alimentos secos.

Estos efectos dependen de la ruptura parcial de estructuras celulares y redistribución de agua, hasta el punto de que la dosis tecnológica aplicada no puede inducir un daño estructural severo.

3.9.4 Influencia del tipo de alimento

El impacto sensorial de la irradiación varía significativamente según la matriz alimentaria se muestra en la Tabla 3.7:

Tabla 3.7. Impacto sensorial de la irradiación según el tipo de alimento

Tipo de alimento	Atributo más sensible	Impacto sensorial
Carnes rojas	Color y aroma	Bajo a moderado
Carne aviar	Aroma	Bajo
Pescados	Aroma	Moderado
Frutas frescas	Textura	Moderado
Vegetales	Color	Bajo
Especias	Aroma	Muy bajo

Fuente: Yang et al., (2021)

3.9.5 Comparación sensorial con métodos térmicos y calor

Desde un punto de vista comparativo, la irradiación conserva mejor la calidad sensorial que los tratamientos térmicos severos, que dan lugar a una:

- Alteración irreversible de la textura.
- Oscurecimiento con reacciones de Maillard.
- Pérdida de los aromas naturales.

Recientes revisiones técnicas indican que los cambios sensoriales producidos por irradiación son en general menores o semejantes a los cambios producidos por procesos de conservación térmicos clásicos (Lambré, Barat, et al., 2022).

3.9.6 Tácticas tecnológicas para conservar la calidad sensorial

Para limitar los impactos sensoriales, la literatura técnica aconseja:

- Aplicar la dosis mínima efectiva.
- Irradiar los alimentos en estado refrigerado o congelado.
- Utilizar atmósferas modificadas.
- Usar envases barrera al oxígeno.
- Combinar la irradiación alimentaria con antioxidantes naturales.

Estas tácticas permiten conservar la calidad sensorial durante el almacenamiento y extender la vida útil de los alimentos sin llegar a renunciar a la aceptación por parte del consumidor.

3.10 Aplicaciones en productos agrícolas y agroindustriales

Las radiaciones en productos agrícolas y agroindustriales constituyen, sin duda, una técnica tecnológico estratégico para aumentar la inocuidad, extender vida útil, favorecer el comercio internacional y disminuir pérdidas poscosecha. De este tipo de aplicaciones se fundamentan por biofísicos que hacen interactuar sobre microorganismos, insectos, procesos fisiológicos, reacciones químicas, sin menoscabar notablemente la calidad del producto.

A diferencia de otros métodos de conservación, las radiaciones permiten intervenir en distintas etapas de la cadena agroalimentaria, desde la producción primaria a elaboraciones industriales y la distribución.

3.10.1 Control fitosanitario y desinfestación de productos agrícolas

En el ámbito de los productos agrícolas frescos, la irradiación se emplea de forma intensiva como método de desinfestación a nivel de cuarentena (inactivando insectos y plagas), eludiendo así la necesidad de recurrir a fumigantes o productos químicos en general. La radiación implica un control de la reproducción de los insectos a través de un daño del ADN afectando el desarrollo del mismo sin causar mortalidad de manera inmediata.

Este razonamiento se hace especialmente importante en frutas que siguen un proceso de exportación, que deben cumplir estrictas normas fitosanitarias.

Los estudios técnicos afirman que dosis bajas ($\leqslant 1$ kGy) acumulan un control efectivo de plagas sin interrumpir la calidad sensorial del producto (Medina et al., 2025).

3.10.2 Inhibición de la brotación y maduración

Los tubérculos y los bulbos, tales como el ajo, la cebolla, la papa, son irradiados con el objetivo de inhibir la brotación durante su almacenamiento. La radiación actúa alterando los tejidos meristemáticos que son los responsables de la brotación a la vez que los alarga la vida útil, favoreciendo de esta manera la reducción de pérdidas durante la fase de post-cosecha parametrizando tanto en un mayor prolongamiento del almacenamiento de los tubérculos y bulbos y con ello una mejora del tratamiento post-cosecha. Este uso tiene un

gran impacto agroindustrial dado que permite un almacenamiento prolongado sin el uso de inhibidores químicos sintéticos.

3.10.3 Aplicaciones en productos agroindustriales procesados

En el ámbito agroindustrial, la irradiación se presenta como una tecnología de control de calidad e inocuidad de productos procesados y semiprocesados como:

- Especias y hierbas secas
- Los productos cárnicos y pesqueros.
- Alimentos listos para el consumo
- Harinas y cereales

En estos productos, la irradiación permite reducciones de la carga microbiana sin afectar notablemente las propiedades funcionales, siendo especialmente adecuada en matrices secas o donde otros tratamientos tienen restricción como se evidencia en la Tabla 3.8:

Tabla 3.8. Aplicaciones de la irradiación en productos agrícolas y agroindustriales

Producto	**Objetivo tecnológico**	**Dosis típica (kGy)**	**Beneficio principal**
Frutas tropicales	Desinfestación	0.3–1.0	Cumplimiento cuarentenario
Papas	Inhibición de brotes	0.05–0.15	Reducción de pérdidas
Especias	Descontaminación	5–10	Alta inocuidad
Carne aviar	Reducción microbiana	2–3	Seguridad sanitaria

Fuente: Medina et al., (2025)

3.10.4 Reducir las pérdidas después de la cosecha

Desde la óptica de la sostenibilidad, la irradiación diferencia las pérdidas poscosecha en función de diferentes elementos que la determinan, que son los siguientes:

- Disminuir el deterioro de los productos agrícolas por efectos del deterioro microbiano.
- Retardar los procesos fisiológicos que tienen lugar en la fruta y en las hortalizas.
- Reducir el daño por infestación.
- Ampliar la vida comercial de los productos.

Esto es especialmente relevante para los países en vías de desarrollo, donde las pérdidas postcosecha suponen un porcentaje elevado de la producción agrícola total.

3.10.5 Integración en procesos agroindustriales

La irradiación puede mantenerse de manera sinérgica con otros procesos de transformación agroindustrial tales como:

- Refrigeración o congelación.
- Secado.
- Envasado al vacío.

- Atmósferas modificadas.

La integración de la irradiación permite disminuir dosis, incrementar la eficiencia energética, así como la calidad final del producto, además de alinearse con enfoques propios de las tecnologías de barrera.

3.10.6 Consideraciones económicas y tecnológicas

La puesta en marcha de instalaciones de irradiación requiere de elevada inversión inicial; no obstante, los estudios costo-beneficio demuestran que esta inversión se traduce en ventajas a largo plazo relacionadas, por ejemplo, con:

- Menores rechazo en el comercio.
- Menor número de devoluciones por incumplimiento sanitario.
- Mejor acceso a mercados internacionales.
- Menores insumos químicos.

3.11 Seguridad radiológica y evaluación de riesgos en la irradiación de alimentos

La seguridad radiológica es un pilar esencial para el uso de radiaciones para fines alimentarios. La evaluación de la seguridad radiológica está basada en principios científicos firmemente establecidos de la física de la radiación, la toxicología, la microbiología y la evaluación de riesgo, para ofrecer certeza sobre el nivel de protección del consumidor, del trabajador y del medio ambiente.

En el ámbito internacional, la irradiación de alimentos es considerada como una tecnología segura en la medida en que se aplique dentro de los límites de dosis y bajo sistemas de control regulatorio estrictos.

3.11.1 Los principios de seguridad radiológica aplicados a alimentos

a) No inducción de radiactividad

Las radiaciones que se utilizan (rayos gamma, electrones acelerados y rayos X) son de energías insuficientes para inducir reacciones nucleares en los alimentos.

b) Dosis controlada y trazable

Las dosis aplicadas son mediciones que sólo se pueden verificar mediante la dosimetría estandarizada: esto garantiza la reproducibilidad y la seguridad.

c) Aplicación justificada

La irradiación se aplica únicamente cuando el beneficio derivado de la aplicación de la irradiación es claramente identificable desde el punto de vista del interés tecnológico o sanitario.

Estos principios están en consonancia con los criterios generales de protección radiológica dados por la ICRP. Allí encontraréis otros principios que hemos expuesto a lo largo de toda la obra.

3.11.2 Evaluación toxicológica de los alimentos irradiados

En la evaluación toxicológica, el objetivo se orienta a esclarecer si la irradiación confiere compuestos químicos perjudiciales; los datos aportados por las investigaciones científicas indican lo siguiente:

- Los productos radiolíticos generados son iguales o menores que los generados por una conservación térmica convencional.
- No se han detectado efectos mutagénicos ni efectos carcinógenos como consecuencia de la irridación de los alimentos irradiados, pues los límites de irradiación controlados no provocan estos efectos.
- Las sustancias perjudiciales no se concentran en cantidades que puedan eventualmente poner en peligro la salud en general.

Las evaluaciones completas de la cuestión realizadas por las Administraciones concluyen que los alimentos irradiados no añaden riesgos toxicológicos a los de los alimentos conservados por otros métodos (Lambré, Barat Baviera, et al., 2022).

3.11.3 La seguridad radiológica para el consumidor

La óptica del propio consumidor, la seguridad radiológica únicamente se asegura con los siguientes puntos:

- Límites máximos de dosis establecidos a nivel internacional de forma científica.
- Etiquetado obligatorio que acredite el tratamiento.
- La existencia de controles en instalaciones y productos.

Cabe mencionar que, tras el consumo de alimentos irradiados, la exposición a la radiación ionizante de los alimentos es nulo ya que la energía empleada en la misma no permanece en él.

3.11.4 Protección radiológica en el trabajo

La evaluación de riesgos también incluye la protección del personal que opera instalaciones de irradiación. Las medidas que se toman en este sentido son las siguientes:

- Blindajes estructurales.
- Sistemas de enclavamiento y de control automático.
- Protocolos estandarizados de operación.
- Monitoreo dosimétrico del personal.

Los niveles de exposición de los trabajadores que se han medido en instalaciones modernas están muy por debajo de los límites referidos a nivel internacional, por lo que el riesgo radiológico para los trabajadores sería mínimo.

3.11.5 Evaluación cuantitativa del riesgo

Las técnicas utilizadas para la evaluación del riesgo por irradiación de alimentos son cuantitativas e incluyen:

- Probabilidades de la presencia de peligros microbiológicos.
- Eficacia del tratamiento para reducir el riesgo.
- Posibilidad de un cierto impacto sobre la salud pública.

Modelos de evaluación cuantitativa del riesgo (QMRA) han puesto de manifiesto que la irradiación reducía drásticamente las probabilidades de enfermedad de origen alimentario, sobre todo en productos listos para su consumo como se muestra en la Tabla 3.9:

Tabla 3.9. Evaluación de riesgos asociados a la irradiación de alimentos

Dimensión evaluada	**Riesgo identificado**	**Nivel de riesgo**	**Observación**
Radiactividad inducida	Inexistente	Nulo	Energías no nucleares
Toxicidad química	Muy bajo	Bajo	Productos radiolíticos seguros
Pérdida nutricional	Limitada	Bajo	Comparable a procesos térmicos
Exposición ocupacional	Controlada	Bajo	Dentro de límites ICRP
Impacto ambiental	Mínimo	Bajo	Sistemas cerrados

Fuente: Lambré Baviera, et al., (2022)

3.11.6 Comparación del riesgo con otros métodos de conservación

Desde el marco de la comparación, la irradiación es un método que tiene un perfil de riesgo igual o más bajo al de otros métodos bien aceptados, como son: pasteurización térmica, esterilización comercial, uso de aditivos químicos y fumigación química post-cosecha. En particular, la sustitución de fumigantes químicos por irradiación ha

reducido los riesgos ambientales y toxicológicos asociados a residuos persistentes.

3.11.7 Gestión del riesgo y control regulador

La gestión del riesgo en irradiación de alimentos es responsabilidad de:

- Auditorías periódicas de instalaciones.
- Validación dosimétrica de procesos.
- Programas de vigilancia sanitaria.
- Homologación con estándares internacionales.

Los cuales aseguran que la tecnología pueda aplicarse de manera segura, transparente y científica.

3.12 Normativa y regulación internacional sobre irradiación

La reglamentación de la irradiación de los alimentos ha tenido lugar luego de muchas décadas de evaluación científica, consenso internacional y armonización normativa, y su principal objetivo es garantizar que dicha tecnología ya se aplique con seguridad, de manera transparente y científicamente fundamentada, protegiendo la salud de los consumidores

y permitiendo la realización del comercio internacional de los mismos alimentos.

A nivel internacional, la reglamentación de la irradiación de los alimentos está soportada por las evaluaciones de riesgo llevadas a cabo

por los organismos científicos internacionales y se implementa mediante los marcos normativos nacionales y regionales.

3.12.1 Marco regulador internacional

La regulación internacional de la irradiación de alimentos se establece principalmente en el trabajo coordinado de los siguientes organismos:

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)
- Organización Mundial de la Salud (OMS / WHO)
- Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA)
- Comisión del Codex Alimentarius (CAC).

Por lo que estos organismos han establecido principios científicos y directrices técnicas que sirven de fundamento para las legislaciones que existe en cada país.

3.12.2 Norma General del Codex Alimentarius

La irradiación de alimentos queda regulada por el Codex Alimentarius, el cual establece el marco regulador internacional más importante en dicha materia mediante:

- Norma General del Codex para los Alimentos Irradiados (CXS 106-1983)
- Código de Prácticas para la Operación de Instalaciones de Irradiación

Los cuales regulan aspectos tales como:

- Tipos de radiación permitidos (rayos gamma, electrones acelerados y rayos X).
- Límites de dosis absorbida.
- Requisitos de dosimetría y Control del proceso.
- Buenas prácticas de manufactura.
- Requisitos de etiquetado.

3.12.3 Marco normativo y regulación de la irradiación de alimentos en Ecuador

La irradiación de alimentos en el Ecuador necesita sometimiento a las reglas del sistema nacional de control sanitario, de inocuidad alimentaria y de protección del consumidor, conforme a los principios científicos y normativos del Codex Alimentarius, de la FAO, de la OMS y del Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA).

Aunque el uso de la tecnología de la irradiación de alimentos en el Ecuador es aún incipiente en el ámbito de la industria, el marco normativo vigente no prohíbe dicha tecnología, siempre y cuando se tomen en cuenta todos los requisitos técnicos, sanitarios y regulatorios de las autoridades competentes.

a) Las entidades competentes en este campo en el Ecuador

Coordinar y controlar alimentos irracionados en el Ecuador involucra, principalmente, a:

- ARCSA: Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria
- Ministerio de Salud Pública (MSP)
- Agencia de Regulación y Control Fito y Zoosanitario (AGROCALIDAD)
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN)

Las cuales trabajan mancomunadamente para asegurar la inocuidad, trazabilidad y la correcta normativa de los alimentos sometidos a tecnologías no convencionales.

b) Irradiación en la importación y exportación de alimentos

Ecuador permite la importación de alimentos que proceden de países exportadores que recurren a la irradiación, después de que se cumplen las condiciones siguientes:

- Dicha irradiación es admitida en el país de origen.
- Es requisito el cumplimiento de los requerimientos de etiquetado.
- Hay el debido respaldo técnico según lo establecido por el Codex Alimentarius.

Esto es especialmente importante para lo que se conoce como:

- Especias
- Productos agrícolas
- Alimentos vegetales en general con fines de la exportación.

c) Etiquetado de la irradiación también de alimentos en Ecuador

De acuerdo con el reglamento Sanitario de los Alimentos y con los lineamientos que ARCSA el etiquetado debe ser explícito en cuanto a la irradiación del alimento a través del etiquetado.

Se deberá dar una declaración de las irradiaciones que sea clara.

Se reconocen los símbolos internacionales de la Radura (Codex).

El etiquetado apunta a asegurar la:

- Transparencia.
- Derecho a la información.
- Protección del consumidor.

d) *Posibilidades y perspectivas para el Ecuador*

Desde una perspectiva estratégica, la irradiación de alimentos para el Ecuador es una oportunidad en cuanto a:

- Disminución de las pérdidas en postcosecha.
- Mejoramiento de la inocuidad en productos de exportación.
- Cumplimiento de las exigencias fitosanitarias internacionales.
- Sustitución de los tratamientos químicos prohibidos.

La literatura técnica está de acuerdo con que la adopción gradual de esta tecnología, conforme a ella, podría contribuir a la competitividad de la agroalimentación ecuatoriana (Yang et al., 2021).

En este sentido, la Tabla 18 compara las normas sobre procedimientos de irradiación de alimentos en Ecuador, Estados Unidos, la Unión Europea, Brasil, Argentina y el Codex Alimentarius, considerando las

autoridades regulatorias, el estado de la técnica en el marco jurídico, los alimentos a partir de los cuales puede aplicarse y los marcos normativos que fundamentan la implementación de la irradiación de alimentos.

Tabla 3.10. Comparativa internacional sobre normativa de irradiación de alimentos

País / Región	**Autoridad reguladora**	**Estado legal de la irradiación**	**Alimentos autorizados**	**Base normativa**
Ecuador	ARCSA / Ministerio de Salud Pública	Permitida bajo regulación sanitaria	Especias, condimentos, hierbas secas (principalmente)	Reglamento Sanitario ARCSA + Codex Alimentarius
Estados Unidos	FDA / USDA	Permitida	Carnes, frutas, vegetales, especias, mariscos	21 CFR Part 179
Unión Europea	EFSA / Comisión Europea	Permitida con restricciones	Hierbas secas, especias	Directiva 1999/2/EC
Brasil	ANVISA	Permitida	Amplia variedad de alimentos	RDC N° 21/2001
Argentina	SENASA / ANMAT	Permitida	Especias, frutas, carnes	Código Alimentario Argentino
Codex Alimentarius	FAO / OMS	Permitida	Según evaluación de inocuidad	CAC/RCP 19-1979

Fuente: Codex Alimentarius, (2025)

3.13 Percepción del consumidor y comunicación del riesgo

La interpretación del consumidor constituye uno de los factores limitantes en la adopción de tecnologías de irradiación de alimentos aun cuando exista una gran evidencia científica que dé cuenta de la inexistencia de riesgos en su uso. Existen evidencias en la literatura que muestran la resistencia a la adopción de tecnologías de irradiación no sustentada en riesgos reales sino por factores psicológicos, falta de conocimiento técnico y asociaciones erróneas entre radiactividad nuclear.

Desde la óptica de la comunicación del riesgo el uso de tecnologías de irradiación de alimentos se enfrenta a la resistencia al riesgo denominada "radiation stigma", fenómeno que ha sido ampliamente documentado en la literatura científica, siendo el término "radiación" el que produce temor sin importar la dosis o el tipo de radiación empleado.

Según estudios de percepción realizados en América Latina y Europa se puede concluir que:

- La aceptación de la irradiación de alimentos aumentaba significativamente cuando se presentaban a los consumidores información clara, visual y basada en evidencia.
- El aval por parte de organismos internacionales (OMS, FAO, IAEA), incrementaba la confianza.

- Etiquetar el producto de forma transparente y en combinación con campañas educativas incrementaba el sentido de aceptación de la irradian de alimentos.

Junto a ello investigaciones recientes menciona que la confianza en institucional (parte del usuario hacia el sistema productor de irradiados) es un mejor predictivo de aceptación que el conocimiento técnico del consumidor (Jeltema et al., 2016).

Además, se demostró que la aceptación de los alimentos irradiados puede aumentar por un incremento de hasta el 40 % al presentar la información en términos de beneficios directos, de reducción de los patógenos, de vida útil,

3.13.1 Estrategias de comunicación del riesgo eficaces

En el contexto ecuatoriano, la ausencia de campañas de difusión científica ha limitado el conocimiento público sobre la irradiación, lo que llega a inferir la instauración de estrategias comunicacionales unidas entre ARCSA, la academia y el sector productivo. Tales como:

- Uso de lenguaje técnico accesible (eludiendo la terminología nuclear).
- Prevalencia del enfoque en beneficios para la salud y en el descenso de enfermedades de transmisión alimentaria.
- Incorporación de sellos oficiales y de respaldo institucional.
- Educación desde la cadena productiva hasta el consumidor final.

CONCLUSIONES

La transición hacia la biopreservación de precisión el estudio de los microorganismos ha evolucionado de una visión meramente alterante hacia un modelo de antagonismo biológico dirigido. Se concluye que el uso de probióticos y sus bacteriocinas constituye una barrera tecnológica superior a los conservantes químicos tradicionales, ya que permite el control específico de patógenos persistentes (como *Listeria monocytogenes*) mediante mecanismos de exclusión competitiva y *quorum quenching*, garantizando la inocuidad sin degradar el perfil sensorial del alimento.

Sinergia biótica y estabilidad tecnológica la eficacia de un alimento funcional no depende de un solo componente, sino de la interacción sistémica entre probióticos, prebióticos y postbióticos. Mientras que los prebióticos aseguran la viabilidad y el metabolismo bacteriano en el colon, los postbióticos representan la frontera de la innovación al ofrecer una solución estable y segura para matrices alimentarias que requieren procesos térmicos severos. Esta tríada biótica, respaldada por validaciones ómicas y marcos regulatorios estrictos (GRAS/QPS), redefine la seguridad alimentaria como un proceso dinámico de modulación del ecosistema microbiano.

El imperativo de la validación molecular y la personalización la seguridad y eficacia de los agentes bióticos han trascendido el conteo de colonias tradicional para fundamentarse en la caracterización genómica de precisión. Se concluye que la integración de tecnologías

ómicas y la edición genética (CRISPR) son esenciales para mitigar riesgos emergentes, como la transferencia de genes de resistencia antimicrobiana, permitiendo el diseño de simbióticos de precisión. Este enfoque no solo asegura el cumplimiento de las normativas internacionales (FDA/EFSA), sino que proyecta una industria capaz de ofrecer soluciones nutricionales personalizadas que responden a la variabilidad individual del microbioma humano.

Las radiaciones, ya sean ionizantes o no, constituyen unas de las técnicas biotecnológicas más importantes para la seguridad alimentaria actual, porque permiten un adecuado control de la microbiología y deterioro sin comprometer la calidad de los alimentos. Su sólida base biofísica y la reiteración de evidencias científicas, permite asegurar que su utilización sea segura y eficaz. La combinación con otras tecnologías de conservación multiplica la eficacia y sostenibilidad de las radiaciones. Pero su aplicación exige marcos regulatorios y correcta gestión del riesgo. Las radiaciones se convierten en una estrategia frente a los principales retos de la seguridad alimentaria.

GLOSARIO

- **Aminas Biógenas:** Compuestos nitrogenados (como histamina o tiramina) formados por la descarboxilación de aminoácidos por parte de ciertos microorganismos. Su acumulación en alimentos puede causar toxicidad.
- **Antagonismo Microbiano:** Relación entre microorganismos donde uno inhibe el crecimiento o la actividad del otro mediante la producción de sustancias químicas (ácidos, bacteriocinas) o competencia por nutrientes.

- **Bacteriocinas:** Péptidos o proteínas sintetizados por bacterias (frecuentemente bacterias ácido lácticas) que poseen actividad bactericida o bacteriostática contra cepas estrechamente relacionadas o patógenos específicos.
- **Biofilm (Biopelícula):** Comunidad de microorganismos adheridos a una superficie y embebidos en una matriz extracelular protectora, lo que les otorga una alta resistencia a desinfectantes y antibióticos.
- **Biopreservación:** Extensión de la vida útil y mejora de la seguridad de los alimentos mediante el uso de microorganismos naturales o sus metabolitos antimicrobianos.

- **Cepa-especificidad:** Concepto que indica que los beneficios y características de un probiótico son exclusivos de una cepa particular y no se pueden generalizar a toda la especie.

- **Cultivo Iniciador (*Starter*):** Microorganismos seleccionados que se añaden a una materia prima para realizar una fermentación controlada y predecible.

- **Exclusión Competitiva:** Proceso por el cual los microorganismos benéficos ocupan los sitios de adhesión en el epitelio intestinal o la matriz alimentaria, impidiendo físicamente que los patógenos se establezcan.

- **GRAS (*Generally Recognized as Safe*):** Designación de la FDA (EE. UU.) para sustancias que expertos consideran seguras bajo las condiciones de su uso previsto en alimentos.

- **Inocuidad Alimentaria:** Garantía de que los alimentos no causarán daño al consumidor cuando se preparen y/o consuman de acuerdo con el uso a que se destinan.

- **Metabolitos Bioactivos:** Compuestos producidos por el metabolismo microbiano (como ácidos orgánicos o péptidos) que ejercen un efecto fisiológico positivo en el hospedador.
- **Microbiota:** Conjunto de microorganismos que viven en un entorno específico, como el tracto gastrointestinal humano o un sistema alimentario.

- **Postbióticos:** Preparación de microorganismos inanimados y/o sus componentes que confieren un beneficio a la salud del hospedador.

- **Prebióticos:** Sustratos utilizados selectivamente por microorganismos del hospedador que confieren un beneficio para la salud.
- **Probióticos:** Microorganismos vivos que, cuando se administran en cantidades adecuadas, confieren un beneficio a la salud del hospedador.
- **Psicrótrofos:** Microorganismos capaces de crecer a temperaturas de refrigeración (**0°C a 7°C**), siendo críticos en la alteración de alimentos frescos.

- **QPS (*Qualified Presumption of Safety*):** Sistema de la EFSA (Unión Europea) para evaluar la seguridad de los microorganismos utilizados en la cadena alimentaria basándose en su identidad taxonómica.
- **Quorum Sensing:** Sistema de comunicación celular bacteriana basado en moléculas señal que permite coordinar la expresión de genes, como los de virulencia o formación de biofilms.

- **Simbióticos:** Combinación que contiene tanto probióticos como prebióticos, diseñada para mejorar la supervivencia e implantación del microorganismo en el intestino.

- **Actividad de Agua (aw):** Indica, como parámetro fisicoquímico, la cantidad de agua libre de un alimento que puede ser utilizada para el crecimiento de los microorganismos y como medio donde van a tener lugar las reacciones químicas y enzimáticas.

- **Dosis Absorbida (Gray, Gy):** Cantidad de la energía ionizante que ha sido absorbida por la unidad de masa del alimento en el transcurso del tratamiento de irradiación.
- **Efecto Directo de la Radiación:** Es el daño biológico que se produce a partir de la interacción directa de la radiación con las macromoléculas celulares tales como ADN, proteínas o membranas.
- **Efecto Indirecto de la Radiación:** Es el daño en la célula, mediado a través de radicales libres que se formulan a raíz de la radilisis del agua dentro de los sistemas biológicos o alimentarios.
- **Radiolisis del Agua:** Es el proceso fisicoquímico que da lugar a que la radiación ionizante descomponga las moléculas de agua y que produzca las especies reactivas que dan lugar al daño microbiano.
- **Radicales Libres:** Especies químicas altamente reactivas con electrones desapareados productoras de oxidación de lípidos, proteínas, y ácidos nucleicos.
- **Letalidad Microbiana:** Es la capacidad de un tratamiento físico o químico de inducir la inactivación irreversible de los microorganismos patógenos o alterantes.
- **Tecnología de Barreras (Hurdle Technology):** Es una técnica de conservación de los alimentos que aplica varios factores físicos, químicos o biológicos sinérgicamente para inhibir el crecimiento microbiano.
- **Radioresistencia Microbiana:** Es la capacidad intrínseca de algunos microorganismos para sobrevivir a dosis elevadas de

radiación gracias los mecanismos de reparación celular y de protección antioxidante.

- **Validación del Proceso:** Es el procedimiento científico-documentado que establece que el tratamiento tecnológico alcanzará los objetivos establecidos en los procesos de inocuidad de forma consistente, en este caso la irradiación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almisned, G., Rabaa, E., Sen Baykal, D., Ilik, E., Kilic, G., Zakaly, H. M. H., Ene, A., & Tekin, H. O. (2023). The impact of chemical modifications on gamma-ray attenuation properties of some WO3-reinforced tellurite glasses. Open Chemistry, 21(1). https://doi.org/10.1515/CHEM-2022-0297/XML

Bermudez Brito, M., Plaza Díaz, J., Muñoz Quezada, S., & Gil, A. (2012). Probiotic Mechanisms of Action. Annals of Nutrition and Metabolism, 61(2), 160–174. https://doi.org/https://doi.org/10.1159/000342079

Burdock, G. A., & Carabin, I. G. (2004). Generally recognized as safe (GRAS): history and description. Toxicology Letters, 150(1), 3-18. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2003.07.004

Cell Editorial Team, T. (2024). Moving structural biology forward together. Cell, 187(3), 511–512. https://doi.org/10.1016/j.cell.2024.01.006

Codex Alimentarius. (2025). Commission Procedural Manual. https://doi.org/10.4060/CD7978EN

D'aes, J., Fraiture, M. A., Bogaerts, B., Van Laere, Y., De Keersmaecker, S. C. J., Roosens, N. H. C., & Vanneste, K. (2025). Metagenomics-based tracing of genetically modified microorganism contaminations in commercial fermentation products. Food Chemistry: Molecular Sciences, 10, 100236. https://doi.org/10.1016/J.FOCHMS.2024.100236

Dankar, I., Melhem, A., Serhan, M., & Hassan, H. F. (2025). Microbial and processing factors affecting biogenic amine formation and accumulation in dairy: a narrative review. Applied Food Research, 5(2), 101376. https://doi.org/10.1016/J.AFRES.2025.101376

Dhiman, S., Kaur, S., Thakur, B., Singh, P., & Tripathi, M. (2025). Nutritional Enhancement of Plant-Based Fermented Foods: Microbial Innovations for a Sustainable Future. Fermentation, 11(6). https://doi.org/10.3390/FERMENTATION11060346

Dymchenko, A., Geršl, M., & Gregor, T. (2023). Trends in bread waste utilisation. Trends in Food Science & Technology, 132, 93–102. https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2023.01.004

Fallah, A. A., Sarmast, E., Ghasemi, M., Jafari, T., Mousavi Khaneghah, A., & Lacroix, M. (2023). Combination of ionizing radiation and bio-based active packaging for muscle foods: A global systematic review and meta-analysis. Food Chemistry, 405, 134960. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.134960

Feng, J., Berton, C. C., Fogliano, V., & Schroën, K. (2022). Maillard reaction products as functional components in oil-in-water emulsions: A review highlighting interfacial and antioxidant properties. Trends in Food Science & Technology, 121, 129–141. https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2022.02.008

Feng, J., Berton-Carabin, C. C., Fogliano, V., & Schroën, K. (2022). Maillard reaction products as functional components in oil-in-water emulsions: A review highlighting interfacial and antioxidant properties. Trends

in Food Science & Technology, 121, 129–141. https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2022.02.008

Galanakis, C. M. (2020). Food Quality and Shelf Life. Academic Press. https://doi.org/https://shop.elsevier.com/books/food-quality-and-shelf-life/galanakis/978-0-12-817190-5

Gibson, G. R., Hutkins, R., Sanders, M. E., Prescott, S. L., Reimer, R. A., Salminen, S. J., Scott, K., Stanton, C., Swanson, K. S., Cani, P. D., Verbeke, K., & Reid , G. (2017). Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 14, pages491–502. https://doi.org/https://www.nature.com/articles/nrgastro.2017.75

Hill, C., Guarner, F., Reid, G., Gibson, G. R., Merenstein, D. J., Pot, B., Morelli, L., Canani, B. R., Flint, H. J., Salminen, S., Calder, P. C., & Sanders, M. E. (2014). The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 11, 506–514. https://doi.org/https://www.nature.com/articles/nrgastro.2014.66

Hamidah, H. K., Khumaidi, A., Munadhif, I., & Adhitya, R. Y. (2024). Development of a Prototype System for Monitoring and Controlling Apple Cider Vinegar Fermentation Using IoT-Based Fuzzy Methods. International Journal of Mechanical, Electrical and Civil Engineering, 1(3), 138–158. https://doi.org/10.61132/IJMECIE.V1I3.35

Ibrahim, S. E., Mesady, I. A., Semary, M. M., & Othman, S. M. (2023). Physical, thermal and optical properties of Cd-doped phosphate based glass system. Radiation Physics and Chemistry, 209, 110955. https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSCHEM.2023.110955

Jeltema, M., Beckley, J., & Vahalik, J. (2016). Food texture assessment and preference based on Mouth Behavior. Food Quality and Preference, 52, 160–171. https://doi.org/10.1016/J.FOODQUAL.2016.04.010

Jeong, J., & Kim, S. (2024). Application of machine learning for quantitative analysis of industrial fermentation using image processing. Food Science and Biotechnology, 34(2), 373. https://doi.org/10.1007/S10068-024-01744-4

Kitessa, D. A. (2024). Review on effect of fermentation on physicochemical properties, anti-nutritional factors and sensory properties of cereal-based fermented foods and beverages. Annals of Microbiology 2024 74:1, 74(1), 32-. https://doi.org/10.1186/S13213-024-01763-W

Lambré, C., Barat Baviera, J. M., Bolognesi, C., Cocconcelli, P. S., Crebelli, R., Gott, D. M., Grob, K., Lampi, E., Mengelers, M., Mortensen, A., Rivière, G., Steffensen, I. L., Tlustos, C., Van Loveren, H., Vernis, L., Zorn, H., Andryszkiewicz, M., Gomes, A., Liu, Y., … Chesson, A. (2022c). Safety evaluation of the food enzyme α-amylase from Cellulosimicrobium funkei strain AE-AMT. EFSA Journal, 20(8), e07463. https://doi.org/10.2903/J.EFSA.2022.7463;JOURNAL:JOURNAL:18314732;WGROUP:STRING:PUBLICATION

Lim, E. J., Hafiz, M., & Rahim, A. (2025). Fermentation for Enhanced Biosynthesis and Bioavailability of Micronutrients, Prebiotics, Bioactive Peptides and Functional Fatty Acids in Food Products. International Journal of Advanced Research in Food Science and Agriculture Technology, 4(1), 9–27. https://doi.org/10.37934/FSAT.4.1.927A

Luo, S., & Koksel, F. (2023). Application of physical blowing agents in extrusion cooking of protein enriched snacks: Effects on product expansion, microstructure, and texture. Trends in Food Science & Technology, 133, 49–64. https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2023.01.012

Ma, W., & Johnson, E. T. (2021). Natural flavour (E,E)-2,4-heptadienal as a potential fumigant for control of Aspergillus flavus in stored peanut seeds: Finding new antifungal agents based on preservative sorbic acid. Food Control, 124, 107938. https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2021.107938

Medina, S. V., Hernández, J. A., Gómez, M. S., & Fernández, J. P. (2025). Storage Behavior and Response to Low-Cost Postharvest Technologies of the Underutilized Purple Yampee (Dioscorea trifida L.f.). Foods, 14(14), 2436. https://doi.org/10.3390/FOODS14142436/S1

Mikulajová, A., Matejčeková, Z., Kohajdová, Z., Mošovská, S., Hybenová, E., & Valík, Ľ. (2024). Changes in phenolic composition, antioxidant, sensory and microbiological properties during fermentation and storage of maize products. Food Production, Processing and Nutrition 2024 6:1, 6(1), 9-. https://doi.org/10.1186/S43014-023-00191-8

Marco, M. L., Heeney, D., Binda, S., Cifelli, C. J., Cotter, P. D., Foligné, B., Gänzle, M., Kort, R., Pasin, G., Pihlanto, A., Smid, E. J., & Hutkins, R. (2017). Health benefits of fermented foods: microbiota and beyond. Current Opinion in Biotechnology, 44, 94-102. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.11.010

Oteiza, J., & Barril, P. (2020). Seguridad microbiológica de los alimentos fermentados. CONICET. https://bicyt.conicet.gov.ar/fichas/produccion/9228074?utm_source=chatgpt.com

Parapouli, M., Vasileiadis, A., Afendra, A.-S., Hatziloukas, E., Parapouli, M., Vasileiadis, A., Afendra, A.-S., & Hatziloukas, E. (2020). Saccharomyces cerevisiae and its industrial applications. AIMS Microbiology 2020 1:1, 6(1), 1–31. https://doi.org/10.3934/MICROBIOL.2020001

Possas, A., & Pérez, F. (2024). Detection, Control, Risk Assessment, and Prevention of Foodborne Microorganisms. Foods (Basel, Switzerland), 13(10). https://doi.org/10.3390/FOODS13101551

Ray, A., Sinha, C., Sharma, A. K., Khamrui, K., Hussain, S. A., Dabas, J. K., & Mohanty, T. K. (2026a). AI-driven real-time monitoring and predictive control system for yoghurt fermentation. Food Control, 182, 111857. https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2025.111857

Sepulveda, L. P. E., Covarrubias, M. S., & Dorantes, N. R. (2024). Diseño de un bioproceso industrial para la formulación de biofertilizante a base de lombricomposta y quitina: Design of an industrial bioprocess for the formulation of biofertilizer based on vermicompost and chitin.

LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, 5(4), 3497-3513–3497 – 3513. https://doi.org/10.56712/LATAM.V5I4.2509

Shafi, Z., Habiba, U., Singh, R., Singh, A., & Luo, W. J. (2025). Non-Ionizing Processing Technologies for Meat: Mechanistic Insights, Safety Enhancement, and Sustainable Applications. Journal of Food Process Engineering, 48(11), e70276. https://doi.org/10.1111/JFPE.70276;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER

Sivixay, S., Bai, G., Tsuruta, T., Nishino, N., Sivixay, S., Bai, G., Tsuruta, T., & Nishino, N. (2021). Cecum microbiota in rats fed soy, milk, meat, fish, and egg proteins with prebiotic oligosaccharides. AIMS Microbiology 2021 1:1, 7(1), 1–12. https://doi.org/10.3934/MICROBIOL.2021001

Song, H. Y., Kim, K. il, Han, J. M., Park, W. Y., Seo, H. S., Lim, S., & Byun, E. B. (2022). Ionizing radiation technology to improve the physicochemical and biological properties of natural compounds by molecular modification: A review. Radiation Physics and Chemistry, 194, 110013. https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSCHEM.2022.110013

Stefas, D., Gyftokostas, N., Kourelias, P., Nanou, E., Tananaki, C., Kanelis, D., Liolios, V., Kokkinos, V., Bouras, C., & Couris, S. (2022). Honey discrimination based on the bee feeding by Laser Induced Breakdown Spectroscopy. Food Control, 134, 108770. https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2021.108770

Salminen, S., Collado, M. C., Endo, A., Hill, C., Lebeer, S., Quigley, E. M., Sanders, M. E., Shamir, R., Swann, J. R., Szajewska , H., & Vinderola , G. (2021). The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 18(9), 649–667. https://doi.org/https://www.nature.com/articles/s41575-021-00440-6

Sanders, M. E., Merenstein, D. J., Reid, G., Gibson, G. R., & Rastall, R. A. (2019). Probiotics and prebiotics in intestinal health and disease: from biology to the clinic. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 16(10), 605-616. https://doi.org/https://www.nature.com/articles/s41575-019-0173-3

Silva, C. C., Silva M, S. P., & Ribeiro, S. C. (2018). Application of Bacteriocins and Protective Cultures in Dairy Food Preservation. Frontiers in Microbiology, 9, 594. https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00594

Singh, V. P. (2018). Recent approaches in food processing and preservation. PubMed Central, 55(10), 3849–3863. https://doi.org/10.4314/ovj.v8i1.16

Terpou, A., Papadaki, A., Lappa, I. K., Kachrimanidou, V., Bosnea, L. A., & Kopsahelis, N. (2019). Probiotics in Food Systems: Significance and Emerging Strategies Towards Improved Viability and Delivery of Enhanced Beneficial Value. Nutrients, 11(7), 1591. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/nu11071591

Wang, K., Wu, L., Li, Y., & Li, H. (2022). Preparation and characterization of chitosan/halloysite nanotubes composite film with ethylene scavenging and gas resistance for active food packaging. Journal of Food Safety, 43(2), e13027. https://doi.org/10.1111/JFS.13027

Wei, Z., Li, S., Jiang, Y., & Shi, J. (2025). Recent advances in implicit salt reduction innovative technologies: Innovative strategies and future challenges. Food Research International, 221, 117346. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2025.117346

Yang, X., Li, A., Li, D., Guo, Y., & Sun, L. (2021a). Applications of mixed polysaccharide-protein systems in fabricating multi-structures of binary food gels—A review. Trends in Food Science & Technology, 109, 197–210. https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.01.002

Yehuala, T. F., Atlabachew, M., Karavoltsos, S., Sakellari, A., Aslam, M. F., Allen, L., Griffiths, H., Kanellou, A., Zoumpoulakis, P., Gichohi-Wainainah, W., Endalew, H. W., Abera, M. K., Tenagashaw, M. W., Gessesse, G. D., & Cherie, H. A. (2025). Effect of fermentation on the proximate composition, antinutrients, bioaccessibility of minerals, and sensory quality of pearl millet-based Injera. International Journal of Food Science and Technology, 60(2), 132. https://doi.org/10.1093/IJFOOD/VVAF132

Zanardi, E., Caligiani, A., & Novelli, E. (2020). New Insights to Detect Irradiated Food: an Overview. Food Analytical Methods, 11(1), 224–235. https://doi.org/10.1007/S12161-017-0992-1

Zhao, S., Jiao, T., Adade, S. Y. S. S., Wang, Z., Ouyang, Q., & Chen, Q. (2025). Digital twin for predicting and controlling food fermentation:

A case study of kombucha fermentation. Journal of Food Engineering, 393, 112467. https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2025.112467

Zendeboodi, F., Khorshidian, N., Mortazavian, A. M., & Cruz, A. G. (2020). Probiotic: conceptualization from a new approach. Current Opinion in Food Science, 32, 103-123. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.009



Biotecnología y biofísica en la seguridad alimentaria: nuevas herramientas para la agroindustria, se publicó en el mes de febrero de 2026.

ISBN: 978-9907-802-04-7

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

BIOGRAFÍA DE LOS AUTORES

Georgina Esther Carmilema Yungan:
Ingeniera en Industrias Pecuarias, de nacionalidad Ecuatoriana. Posee una maestría en Agroindustrias, mención Gestión de la Calidad y Seguridad Alimentaria. Es docente de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). Imparte la cátedra de Biología y Metodología de Investigación en las carreras de Agroindustrias Biología General en la carrera de Medicina Veterinaria.

Nora Tahirí Mejía Cabezas:
Es Biofísica, Máster en Física y Doctoranda en Física por la Universidad de Valladolid. Se desempeña como docente universitaria en la ESPOCH en diversas áreas. Su labor académica se centra en la aplicación de la Física y la Biofísica en diversos campos. Integra docencia, investigación y análisis científico desde una perspectiva interdisciplinaria.

María Gabriela Arias Garnica:
Máster en Cadenas Productivas Agroindustriales por la Universidad Nacional de Chimborazo. Se desempeña como técnica docente universitaria en el Laboratorio de ciencias biologicas de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). Su labor se centra en el apoyo a la docencia práctica, el trabajo de laboratorio y el fortalecimiento de procesos formativos en el área agroindustrial y biológica.

BIOTECNOLOGÍA Y BIOFÍSICA EN LA SEGURIDAD ALIMENTARIA: NUEVAS HERRAMIENTAS PARA LA AGROINDUSTRIA

Estimado lector, el texto describe la evolución de la seguridad alimentaria desde un enfoque reactivo hacia una ingeniería de alta precisión fundamentada en la biotecnología y la digitalización. A través del uso de herramientas moleculares como el quorum quenching y la manipulación de la ecología microbiana, se logra neutralizar patógenos preservando la calidad sensorial de los productos.

Este avance se complementa con la Agroindustria 4.0, donde la integración de Inteligencia Artificial, sensores IoT y Gemelos Digitales permite un monitoreo termodinámico en tiempo real para garantizar la inocuidad por diseño. Finalmente, la implementación de la biofísica de radiaciones como método de conservación no térmico optimiza los estándares fitosanitarios y reduce el uso de químicos, consolidando una hoja de ruta hacia sistemas alimentarios sostenibles y biológicamente superiores.

Agradecemos a todos los lectores que se acercan a esta obra con ánimo de aprender, aplicar y transformar.

GRUPO BLR

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

ISBN: 978-9907-802-04-7