

INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA DE PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS



Grupos de Investigación:

Biotics – Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

Biocología – Universidad de San Buenaventura (USB)

Mejoramiento Genético, agronomía y producción de semillas de hortalizas – Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira (UNAL).



Sello Editorial
Universidad Nacional
Abierta y a Distancia

INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA DE PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS

Autores:

Magda Piedad Valdés Restrepo
Maira Fernanda Ramírez Lasso
Sanín Ortiz Grisales
Andrea Vásquez García
Ginna Alejandra Ordóñez Narváez
Liliana Londoño Hernández
Johannes Delgado Ospina.

Grupos de Investigación:

Biotics – Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).
Biotecnología – Universidad de San Buenaventura (USB)
Mejoramiento Genético, agronomía y producción de semillas de hortalizas – Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira (UNAL).

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD)

Jaime Alberto Leal Afanador

Rector

Constanza Abadía García

Vicerrectora académica y de investigación

Leonardo Yunda Perlaza

Vicerrector de medios y mediaciones pedagógicas

Edgar Guillermo Rodríguez Díaz

Vicerrector de servicios a aspirantes, estudiantes y egresados

Leonardo Emeleth Sánchez Torres.

Vicerrector de relaciones intersistémicas e internacionales

Julialba Ángel Osorio

Vicerrectora de inclusión social para el desarrollo regional y la proyección comunitaria

Claudio Camilo González Clavijo

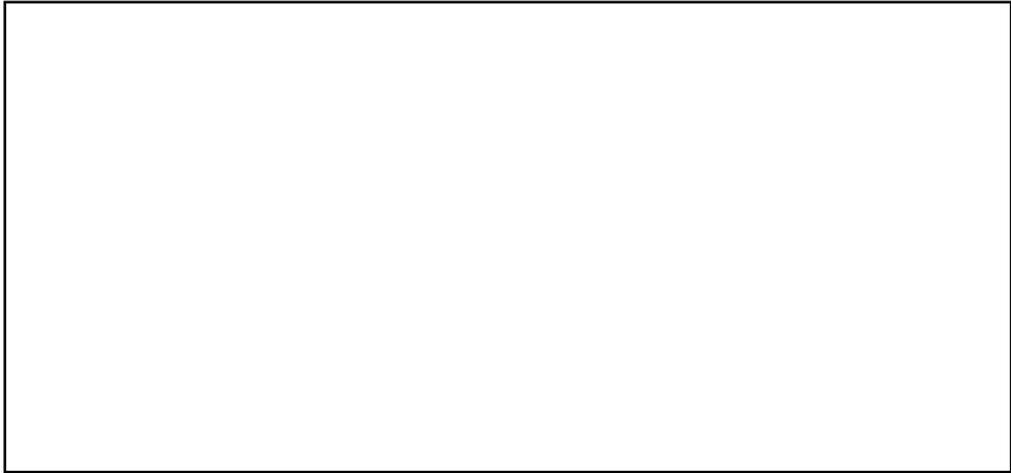
Decano Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería

Juan Sebastián Chiriví Salomón

Líder Nacional del Sistema de Gestión de la Investigación (SIGI)

Martín Gómez Orduz

Líder Sello Editorial UNAD



Introducción a la ingeniería de procesamiento de alimentos

Autores: Magda Piedad Valdés Restrepo, Maira Fernanda Ramírez Lasso, Sanín Ortiz Grisales, Andrea Vásquez García, Ginna Alejandra Ordóñez Narváez, Liliana Londoño Hernández, Johannes Delgado Ospina.

Grupos de Investigación: Biotics – Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Biotecnología – Universidad de San Buenaventura (USB), Mejoramiento Genético, agronomía y producción de semillas de hortalizas – Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira (UNAL).

ISBN: 978-958-XXX

e-ISBN: 978-958-XXX

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería–ECBTI

©Editorial

Sello Editorial UNAD

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Calle 14 sur No. 14-23

Bogotá D.C.

Agosto de 2024

Corrección de textos: Nancy Esperanza Farfán

Diagramación: Hipertexto - Netizen

Edición integral: Hipertexto - Netizen

Cómo citar: Valdés Restrepo, M., Ramírez Lasso, M., Ortiz Grisales, S., Vásquez García, A., Ordóñez Narváez, G., Londoño Hernández, L. y Delgado Ospina, J. (2025). Introducción a la ingeniería de procesamiento de alimentos. Sello Editorial UNAD. DOI PENDIENTE

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons–Atribución – No comercial – Sin Derivar 4.0 internacional. https://co.creativecommons.org/?page_id=13.



CONTENIDO

Reseña del libro	11
Reseña de los autores	13
Presentación	15
Capítulo 1.....	17
Introducción a la ingeniería de alimentos.....	17
Magda Piedad Valdés Restrepo	
Introducción	17
1.1. Propiedades organolépticas de los alimentos..	18
1.2. Diagramas	22
1.3. Aditivos e ingredientes	30
1.4. Actividad del agua y curvas de adsorción y desorción	33
1.5. Materia y energía.....	39
Capítulo 2	
Introducción a las operaciones unitarias en procesos alimentarios	41
Maira Fernanda Ramírez Lasso	
Introducción	41
2.1. Importancia de las operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos o afines	41
Principales operaciones unitarias	42
2.2. Principios físicos y químicos	44
Definiciones de las operaciones unitarias de transformación	44
2.3. Operaciones unitarias de transferencia de materia	52
Operaciones unitarias de transferencia de masa ..	52
2.4. Operaciones unitarias de transmisión de calor.....	59
Conclusión	60
Capítulo 3	
Carnización	61
Sanín Ortiz Grisales	
Introducción	61



Capítulo 4..... 77

Procesos aplicados en la industria láctea 77

Andrea Vásquez García

Introducción.....	77
4.1. Composición de la leche.....	78
4.2. Propiedades físicas y químicas.....	79
4.3. Productos lácteos tradicionales.....	83
4.4. Nuevas tecnologías en el procesamiento de leche.....	97

Capítulo 5

Aceites y grasas alimentarias 101

Ginna Alejandra Ordóñez Narváez

Introducción.....	101
5.1. Estructura fisicoquímica.....	102
5.2. Nomenclatura y clasificación.....	104
5.2.1. Ácidos grasos saturados.....	105
5.2.2. Ácidos grasos insaturados.....	106
5.3. Aceites y grasas en los principales alimentos.....	107
5.4. Reacciones químicas.....	115
5.5. procesamiento.....	118
5.6. análisis fisicoquímicos de aceites y grasas alimentarias.....	121

Capítulo 6

Fundamentos de biotecnología alimentaria..... 125

Liliana Londoño Hernández

Introducción.....	125
6.1. Historia de la biotecnología alimentaria.....	128
6.2. Principios básicos de la biotecnología alimentaria.....	128
6.3. Procesos fermentativos en la industria alimentaria.....	129
6.4. Aplicaciones de la biotecnología alimentaria.....	140
6.5. Nuevas tendencias de la biotecnología alimentaria.....	145

Capítulo 7

Importancia del diseño y análisis de experimentos en ingeniería de alimentos 148

Johannes Delgado Ospina

Introducción.....	148
-------------------	-----



7.1. Elementos de un diseño experimental.....	150
7.2. Diseño completamente al azar (DCA) o análisis de varianza (Anova) de un factor	151
7.3. Diseño con enfoque de un factor a la vez.....	156
7.4. Diseño de Bloques Completos al Azar (BCA) ..	157
7.5. Diseño factorial análisis de la varianza de dos factores con interacción.....	162

Conclusiones 166

Referencias 168

Capítulo 1.....	168
Capítulo 2.....	170
Capítulo 3.....	173
Capítulo 4.....	173
Capítulo 5.....	184
Capítulo 6.....	187
Capítulo 7.....	190



Lista de figuras

Figura 1.1. Coordenadas de color en el sistema Hunter Lab.....	19
Figura 1.2. Mapa de sabores en la lengua.....	21
Figura 1.3. Diagrama de flujo para un zumo de mandarina	24
Figura 1.4. Diagrama de flujo para un producto alimenticio no conforme	25
Figura 1.5. Diagrama de flujo del acondicionamiento del fruto de ahuyama hasta harina.....	26
Figura 1.6. Diagrama de flujo de la extracción de almidón de sagú	27
Figura 1.7. Diagrama de equipos para la extracción de almidón de sagú	27
Figura 1.8. Isotermas de adsorción y desorción.....	36
Figura 1.9. Sistema ideal que representa la ley de conservación de la materia.....	39
Figura 2.1. Diagrama de clasificación de secadores.....	46
Figura 2.2. Torre de platos	54
Figura 2.3. Torre de relleno	55
Figura 2.4. Isotherma de sorción típica de un producto.....	56
Figura 3.1. Cinco especies asociadas con la vida en el Ártico	64
Figura 3.2. Esquema que representa los pasos sucesivos desde el sacrificio de aves hasta la producción de carne y las rutas de contaminación asociadas.....	67
Figura 4.1. Estructura de la leche	79
Figura 4.2. Modelo propuesto de la micela de la leche	82
Figura 4.3. Diagrama de los diferentes tratamientos térmicos de la leche	84
Figura 4.4. Diagrama de elaboración de la crema de leche.....	85
Figura 4.5. Diagrama de elaboración de la mantequilla.....	86
Figura 4.6. Diagrama de elaboración de yogur.....	87
Figura 4.7. Diagrama de producción del kumis.....	88
Figura 4.8. Diagrama de elaboración del queso.....	89
Figura 4.9. Diagrama de elaboración del helado	91
Figura 4.10. Diagrama de elaboración de la leche condensada.....	92
Figura 4.11. Diagrama de elaboración del arequipe.....	93
Figura 5.1. Configuración cis y trans de los dobles enlaces del grupo carboxilos y los extremos metilos.....	103
Figura 5.2. Estructura simple de la conformación de un homotriglicérido	103
Figura 5.3. Medidor butirométrico de Gerber	109
Figura 5.4. Corte de lomo de cerdo en el que se muestra el tejido adiposo (piel de cerdo) y tejido muscular con lo que se denomina marmoleo (grasa entreverada)	111
Figura 5.5. Volumen de producción mundial de las principales semillas oleaginosas.....	113
Figura 5.6. Flujograma de extracción y refinamiento de aceite de soya	119
Tabla 5.7. Principales normas técnicas colombianas ratificadas para la industria de aceites y grasas alimentarias	123
Figura 6.1. Ejemplos de aplicaciones de la biotecnología por colores	126
Figura 6.2. Historia de la biotecnología alimentaria.....	127
Figura 6.3. Ejemplos de microorganismos utilizados en la industria de alimentos	132
Figura 6.4. Fotomicrografía del <i>Lactobacillus acidophilus</i> NCFM	133
Figura 6.5. Fotomicrografía de <i>Rhizopus oryzae</i> (MUCL 28168).....	134
Figura 6.6. Fotomicrografía de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	135

Lista de tablas

Tabla 1.1. Símbolos empleados en diagramas de flujo de proceso.....	23
Tabla 2.1. Terminología para corrientes en operaciones de transferencia de materia.....	58
Tabla 3.1. Comparación nutricional de carne de cerdo, ternera y pollo.....	71
Tabla 4.1. Principales propiedades físicas de la leche.....	81
Tabla 5.1. Denominación de un ácido graso con el mismo nombre de los hidrocarburos de igual número de átomos de carbono, sustituyendo la terminación oico e ico.....	102
Tabla 5.2. Nombre común, número de átomos y fórmula general de los principales ácidos grasos saturados en algunos alimentos.....	105
Tabla 5.3. Nombre común, número de átomos y fórmula general de los principales ácidos grasos insaturados y poliinsaturados en algunos alimentos.....	106
Tabla 5.4. Contenido de grasa y composición para diferentes tipos de carne.....	112
Tabla 5.5. Principales ácidos grasos y su composición en diferentes fuentes vegetales...	115
Tabla 5.6. Temperatura de fusión y punto de humo de diferentes grasas y aceites utilizados para fritura.....	121
Tabla 6.1. Ventajas y desventajas de la fermentación en estado sólido y de la fermentación sumergida.....	131
Tabla 6.1. Tipos de biorreactores usados en fermentación sumergida.....	138
Tabla 6.2. Tipos de biorreactores usados en fermentación en estado sólido.....	139
Tabla 7.1. Pérdida de volumen de la carne de hamburguesa después de cocción para cada uno de los tratamientos aplicados.....	153
Tabla 7.2. Resultados Anova a un nivel de significancia alfa 0,05 para los datos de la tabla 7.1. Diseño completamente al azar.....	154
Tabla 7.3. Resultados del test HSD de Tukey para los datos de la Tabla 7.1. Diseño completamente al azar.....	155
Tabla 7.4. Resultado estadístico de la pérdida de volumen de la carne de hamburguesa después de cocción para cada uno de los tratamientos aplicados.....	156
Tabla 7.5. Porcentaje de jamones sin defectos para cuatro diferentes presiones de compactación, categorizados por lotes del agente de compactación de acuerdo con el diseño en bloques completos al azar.....	159
Tabla 7.6. Resultados Anova a un nivel de significancia alfa 0,05 para los datos de la tabla 7.5. Diseño de bloques completos al azar (BCA).....	160
Tabla 7.7. Resultados del test LSD Fisher para los datos de la tabla 7.5. Diseño de bloques completos al azar (BCA).....	161
Tabla 7.8. Resultado estadístico del porcentaje de jamones sin defectos para cada uno de los tratamientos aplicados.....	162
Tabla 7.9. Grado de aceptación de sabor (unidades arbitrarias) para dos sabores a fruta de una bebida láctea por la adición de tres niveles de edulcorante.....	164
Tabla 7.10. Resultados Anova de dos factores con interacción a un nivel de significancia alfa 0,05 para los datos de la tabla 7.9. Diseño factorial análisis de la varianza de dos factores con interacción.....	165



RESEÑA DEL LIBRO

La presente obra es un recurso valioso para estudiantes y profesionales de la ingeniería de alimentos y áreas afines, proporciona un marco teórico y práctico sólido para la comprensión y aplicación de principios fundamentales en la industria alimentaria, destacando la relevancia de la investigación y el diseño experimental como herramientas clave para la innovación y mejora continua en este campo.

De manera mancomunada, docentes-investigadores de tres instituciones de educación superior de alta calidad a saber: Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira (UNAL) y Universidad de San Buenaventura Cali (USB), reunieron esfuerzos para entregar a la comunidad académica e investigadores un libro con temáticas de formación, insumo que se espera contribuya a darle forma a la combinación de conocimientos en las diferentes áreas de estudio de la ingeniería para formar profesionales capaces de innovar y optimizar procesos que aborden los desafíos actuales de la industria alimentaria.



Magda Piedad Valdés Restrepo

Tecnóloga en Alimentos de la Universidad del Valle, Ingeniera Agroindustrial, Ingeniera Agrónoma, magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en fitomejoramiento y doctora en Ciencias Agrarias con énfasis en mejoramiento genético vegetal (Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira). Docente e investigadora de la Cadena de Formación en Alimentos – Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), líder del Semillero de Investigación Alimentar, adscrito al Grupo de Investigación BIOTICS de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

Maira Fernanda Ramírez Lasso

Ingeniera Agroindustrial de la Universidad de Nariño (Nariño, Colombia). Especialista en Gestión Integral de Proyectos de la Universidad de San Buenaventura (Cali, Colombia). Certificada en Auditoría HSEQ por el Politécnico de Suramérica (Polisura) y Técnica Especialista en Salud y Seguridad en el Trabajo (SST) del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), consultora y asesora en Resolución 2674/2013, docente de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Buenaventura, seccional Cali.

Sanín Ortiz Grisales

Zootecnista, maestro en Ciencias Agrarias con énfasis en sistemas de suministro de semillas, doctor en Ciencias Agrarias con énfasis en mejoramiento genético vegetal, profesor titular adscrito a la Unidad Básica Administrativa en Ciencia Animal de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, investigador del programa Mejoramiento genético, agronomía y producción de semillas de hortalizas y coordinador del laboratorio de semillas.

Andrea Vásquez García

Docente ocasional de la Cadena de Formación en Alimentos – Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Ingeniera Agroindustrial de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. Magíster y doctora en Ingeniería de Alimentos, Universidad de São Paulo, Brasil. Líder del Semillero de Investigación en Microbiología y Biotecnología Alimentaria – SIMBIOAL, adscrito al Grupo de Investigación BIOTICS de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

Ginna Alejandra Ordóñez Narváz

Ingeniera Agroindustrial (Facultad de Ingeniería y Administración de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira). Magíster en Ciencias Agrarias y doctora en Ciencias Agrarias con énfasis en fitomejoramiento (Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira). Docente e investigador junior del Grupo de Investigación BIOTICS de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) ZCSUR.

Liliana Londoño Hernández

Tecnóloga en Alimentos, Ingeniera de Alimentos con maestría en Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle y doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad Autónoma de Coahuila (México). Líder Nacional del Programa Maestría en Biotecnología Alimentaria de la Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería (ECBTI) de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD, Colombia).

Johannes Delgado Ospina

Químico de la Universidad Santiago de Cali, magíster en Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia y doctor en Ciencia de los Alimentos de la Universidad de Teramo (Italia). Docente e investigador de los programas de Ingeniería Agroindustrial y Maestría en Ingeniería Biotecnología de la Universidad de San Buenaventura, Cali.

PRESENTACIÓN

Este libro cubre ampliamente temáticas fundamentales de la ingeniería de alimentos, consolidadas en siete capítulos, los cuales permitirán al lector enriquecer sus conocimientos en varios aspectos, centrándose en los procesos de transformación de materias primas en productos alimenticios destinados tanto a la alimentación humana como animal, a través de diagramas y ejemplos concretos. Los autores han aunado esfuerzos para facilitar la comprensión de procesos complejos que se pueden aplicar en diferentes industrias, como cárnica, láctea, fruver y oleícola, necesarios para mantener la calidad y seguridad de los productos alimenticios, así como la importancia de la trazabilidad desde la materia prima hasta el producto final.

Se incluye una discusión sobre la aplicación de tecnologías, como la edición genética con CRISPR-Cas9, en la mejora de procesos dentro de la industria alimentaria, así como en la modificación genética de microorganismos y plantas para aumentar la eficiencia en la producción de alimentos y mejorar características nutricionales, y se resalta la importancia del diseño experimental en la investigación dentro de la ingeniería de alimentos, explicando los pasos necesarios para la planificación adecuada de un experimento, incluyendo la observación, formulación de hipótesis, y control de variables, detallando los elementos clave de un diseño experimental, como las unidades experimentales, factores, niveles y controles, necesarios para obtener resultados confiables y reproducibles.



INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA DE ALIMENTOS

MAGDA PIEDAD VALDÉS RESTREPO

INTRODUCCIÓN

La ingeniería de alimentos tiene varias líneas de trabajo en el sector agroalimentario, cuya función principal es la transformación de materias primas para la elaboración de productos alimenticios dirigidos a la alimentación humana y animal. En el proceso de elaboración de dichos productos, los ingenieros deben evaluar la trazabilidad desde las materias primas y aditivos, pasando por el proceso de elaboración, hasta obtener el producto final; en el almacenamiento se evalúa la vida útil del producto, para ello se debe aplicar el conocimiento sobre cada operación unitaria, cuyo objetivo siempre será modificar la o las materias primas para un determinado fin, teniendo en cuenta variables de proceso y de control, los fenómenos de transferencia de calor, transferencia de masa, migración producto-empaque y reacciones químicas, físicas y biológicas, con el fin de mantener el valor nutricional del producto.

La dinámica de alimentación mundial está dirigida hacia alimentos saludables y con altos contenidos de nutrientes, esto obliga a las líneas productivas alimentarias a acelerar el mejoramiento continuo y mantenerse dentro de la competencia “tamaño reto”, es por ello que en la elaboración de cada producto dentro de cada una estas líneas se encierran procesos de transformación constituidos en su mayoría por operaciones unitarias comunes, como son: selección, clasificación, limpieza y desinfección.

ción, lavado, empaque y almacenamiento; sin embargo, cada producto enmarca una línea de proceso diverso donde intervienen operaciones unitarias sofisticadas, sumado a las variables de proceso (temperatura, presión, tiempo, etcétera), lo que hace único al proceso.

El proceso es solo un eslabón de la cadena de valor, la cual empieza con la transformación de las materias primas hasta obtener un producto, seguido del almacenamiento, transporte y comercialización. Las líneas de producción en la industria alimentaria se agrupan según el tipo de alimento: industria cárnica, láctea, pesquera, oleícola, fruver, panificación, cacao, azúcar, vinos y cervezas, las más explotadas son las industrias lácteas, cárnicas y fruver. Independiente de la línea de producción, en todas se aplican los principios básicos de la ingeniería de alimentos y de la agroindustria, por tanto, el presente capítulo pretende darle al lector algunas pautas fundamentales en su continuo aprendizaje en el mundo de la industria alimentaria.

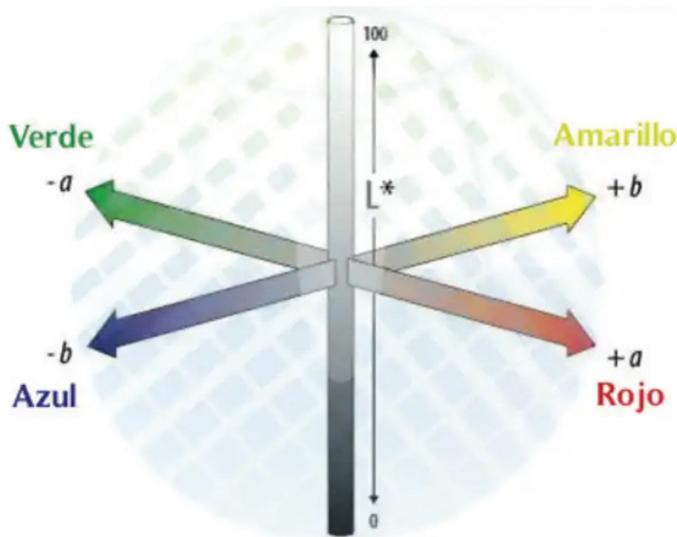
1.1. Propiedades organolépticas de los alimentos

La calidad de las materias primas que hacen parte de un producto alimenticio depende de varios factores, como son: agronómicos, ambientales, tecnológicos y comerciales, que a su vez influyen en las características sensoriales. Asociadas a estas características se reconocen cuatro propiedades organolépticas en los alimentos: color, olor, sabor y textura, las cuales se perciben a través de los sentidos. Sin embargo, la influencia del consumidor, los cambios de preferencia en alimentos y la cultura de sensaciones arraigadas han causado que la industria alimentaria emplee aditivos en sus procesos, con el fin de potenciar estas propiedades.

Color: es el primer contacto que tiene el consumidor con el alimento y suele acompañarse con la apariencia y forma, características que influyen en su decisión de consumo; es una característica subjetiva y sensorial, según Valdés-Restrepo et al. (2023) “La percepción del color es un fenómeno psicofísico donde se relacionan la fisiología de la visión, la psicología del observador y la energía espectral radiante de una fuente de luz visible”. En las frutas, el color del epicarpio cambia dependiendo del grado de madurez (según la pauta respiratoria presente durante el proceso de maduración se puede clasificar en fruto climatérico o no climatérico), variedad y ambiente (Rodríguez-Restrepo et al., 2023). El cambio de coloración se asocia con la presencia de pigmentos de forma natural en las materias primas o la formación de coloraciones ocasionadas en el proceso, debido a reacciones químicas de oxidación

y deterioro. El color se puede medir por diversas escalas y técnicas; se conocen dos escalas principales: el sistema Munsell y el sistema Hunter Lab (figura 1.1). Mediante el sistema Munsell, se establecen tres dimensiones de color: matriz, cromaticidad y luminosidad. Por otro lado, el sistema Hunter está representado por las letras L, A, B, denominado Hunter Lab. L (luminosidad), donde 0 es negro y 100 es blanco, A (rojo-verde), donde los valores positivos son rojos, los valores negativos son verdes y el cero es neutro, y B (amarillo-azul), donde los valores positivos son amarillos, los negativos son azules y el cero es neutro (Mathias-Rettig y Ah-Hen, 2014).

Figura 1.1. Coordenadas de color en el sistema Hunter Lab



Fuente: tomado de Mathias-Rettig y Ah-Hen (2014).

Las técnicas para medir el color son varias. Por ejemplo, visión digital es una técnica que genera imágenes por medio de cámaras digitales que utiliza un software y se interpreta la información como si lo hiciera el ojo humano, esta técnica tiene una amplia aplicación en el aseguramiento de calidad en la industria alimentaria, debido a que no es una técnica invasiva. Otras técnicas son: espectrofotometría, colorimetría, cartas de color, espectrorradiómetro o imágenes hiperespectrales (Valdés-Restrepo et al., 2023).

Olor: el olor va acompañado del aroma. El olor es la percepción de sustancias volátiles que dan fragancia, y el aroma es la detección de compuestos volátiles que se

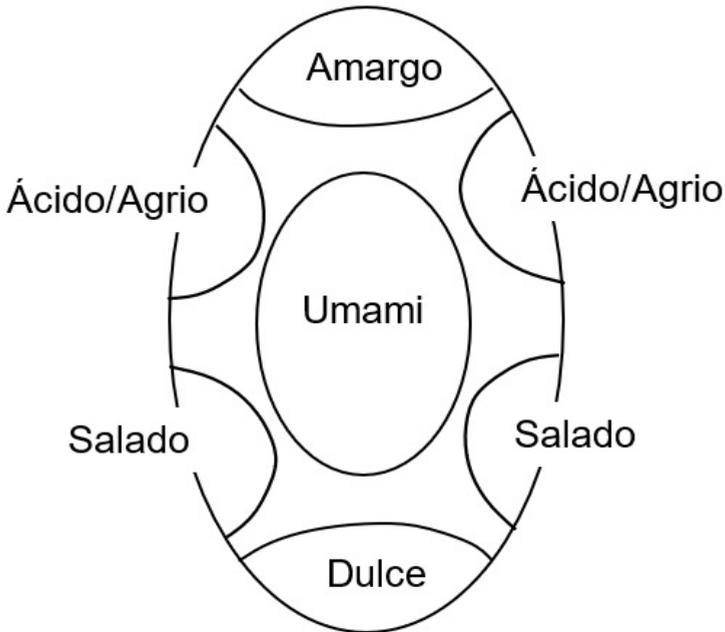
genera al masticar un alimento, los cuales se difunden entre el paladar y la faringe; el olor tiene un valor de umbral de olor, definido como la concentración mínima de una sustancia en la que personas entrenadas (panelistas) pueden identificar el olor característico de la sustancia (Amer et al., 2023). El sentido del olfato se debe a un receptor químico estimulado por las partículas aromáticas que emiten los cuerpos volátiles y estos llegan a las neuronas de dos formas: por el epitelio olfatorio (derecho e izquierdo) o por el canal que conecta la garganta con la nariz (Hernández et al. 2017). Los olores pueden ser naturales o artificiales, a aquellas materias primas que carecen de olor se les denomina inodoras. Los alimentos en contacto con el oxígeno sufren transformaciones químicas que ocasionan su deterioro y, por consiguiente, mal olor, es decir, ocurre un proceso químico de oxidación, donde se elimina un electrón de un átomo o grupo de átomos, siendo los compuestos fenólicos los que primero se oxidan en presencia del oxígeno (Lingjun, 2023).

Sabor: las papilas gustativas presentes en la lengua y en el paladar pueden identificar cinco tipos de sabores: dulce, salado, amargo, ácido y el recientemente descubierto quinto sabor, “el umami” (figura 1.2). Cuando se mastica un alimento, se liberan los sabores, estos compuestos se mezclan con la saliva y viajan hacia las papilas gustativas y es ahí donde se perciben (Duizer y Field, 2015). La reacción al sabor es tan crítica que la industria alimentaria cuenta con paleta de aditivos utilizados para estandarizar sabores y, en menor medida, enmascarar sabores (Orozco Colonia et al. 2023). Este mismo autor señala que la biomasa de las algas y cianobacterias tiene alta calidad nutricional, sin embargo, no se emplea a menudo en alimentos, debido a que resulta poco apetecible al producir sustancias como sulfuro de dimetilo y geosmina, que se producen por la degradación de aminoácidos y pueden dar olor a tierra húmeda y a compuestos volátiles; no obstante, un sabor indeseable puede ser útil, es así como la misma biomasa de algas que presenta un sabor desagradable al emplearse en alimentos dulces puede ser excelente en la preparación de un tentempié salado.

Umami significa “sabor agradable”, conocido como el quinto sabor, incluye los sabores dulce, salado, amargo y ácido. Con frecuencia se describe como un sabor a carne agradable, que se extiende por toda la lengua, se dice que actúa como el glutamato monosódico, que es un potenciador de sabor que estimula las papilas gustativas. El sabor umami fue descubierto en 1907 por el científico japonés Kikunae Ikeda, quien identificó el compuesto que inducía el umami, como L-glutamato, un aminoácido de las proteínas. Debido a este descubrimiento, Ikeda obtuvo una patente que le permitió fabricar el glutamato monosódico (GMS), que consiste en reemplazar un ion H del ácido L-glutámico con el ion Na, lo que induce el sabor uma-

mi puro sin sabor amargo. Se aceptan dos tipos de receptores umami: el heterodímero T1R1/T1R3 y los receptores metabotrópicos de glutamato (mGluR1 y mGluR4) presentes en la membrana de las células gustativas (Yamamoto e Inui-Yamamoto, 2023).

Figura 1.2. Mapa de sabores en la lengua



Fuente: elaboración propia.

Textura: es la propiedad cognitiva que se asigna a los alimentos (Irles y García, 2014) y se considera un atributo de calidad crítico para la selección en la industria alimentaria, la cual debe tener en cuenta las preferencias de textura del consumidor, que suelen cambiar con la edad de la persona (Vázquez-Frías et al., 2023), no obstante, la estructura de las materias primas es fundamental para la construcción de la textura deseada, por ejemplo, la textura de la carne se debe a la estructura de las fibras del tejido muscular, porcentaje de grasa y forma de separación de las fibras al masticar. La textura no tiene una definición exacta, lo que sí se sabe es que produce sensaciones de pegajoso, duro, tierno, blando, crujiente, harinoso, entre otros. La percepción de la textura se distingue mediante la interacción del producto

alimenticio con los dientes y la saliva, también se puede percibir mediante el tacto; según sea el producto que se quiera obtener, la textura se puede lograr aplicando tratamientos térmicos, empleando sacarosa para dar volumen y aportar color, mejorando no solo la textura sino el aspecto del producto. Se puede medir mediante análisis sensoriales o instrumentales, siendo el método instrumental más común el análisis de perfil de textura (APT) empleado para medir, cuantificar y desarrollar parámetros relacionados con la textura, el APT imita las condiciones cuando el producto es sometido a un proceso de masticación, muy empleado en productos cárnicos, quesos, frutas y hortalizas (Torres et al., 2015); el texturómetro es el equipo más empleado para medir la textura que, para la toma de decisiones, debe estar en sinergia con mediciones como dureza, consistencia, firmeza, resistencia, fibrosidad, pegajosidad, adhesividad, extensibilidad, cohesividad, masticabilidad, extruibilidad, gomosidad, resiliencia y elasticidad.

1.2. Diagramas

Las cadenas productivas emplean técnicas para la fabricación de alimentos cada vez más robustas y sofisticadas en pro de obtener productos de calidad y uniformes con procesos eficientes (Madrid Vicente, 2016). Los diagramas son una representación gráfica de cada una de las operaciones unitarias que al unirlas forman un proceso, estos diagramas pueden ser:

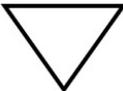
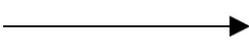
1. Diagrama de flujo de proceso
2. Diagrama de bloques de proceso
3. Diagrama de equipos de proceso

Diagrama de flujo de proceso (DFP), también conocido como flujograma (figuras 1.3 y 1.4), es una representación esquemática que incorpora la secuencia e interacción de las actividades de un proceso a través de símbolos; es una herramienta útil para el estudio de análisis de peligros y puntos críticos de control (APPCC), ya que en este diagrama se tiene una mirada global de proceso y se pueden identificar las posibles fuentes de contaminación y analizar los peligros en cada una de las etapas del proceso. Generalmente, se emplean símbolos (Peinado y Graeml, 2007) que permiten tomar decisiones y se pueden incluir equipos, materias primas, variables de proceso (temperatura, humedad, tiempos, etcétera) y reprocesos, es decir, información relevante.

Símbolos de diagrama de flujo

En los diagramas de flujo se utilizan símbolos para entender la actividad dentro del proceso. A continuación, en la tabla 1.1, se presentan los símbolos más empleados en este tipo de diagramas, sin embargo, no es obligatorio emplear todos los símbolos, solo se usan aquellos que representen las actividades según las necesidades del proceso para la toma de decisiones.

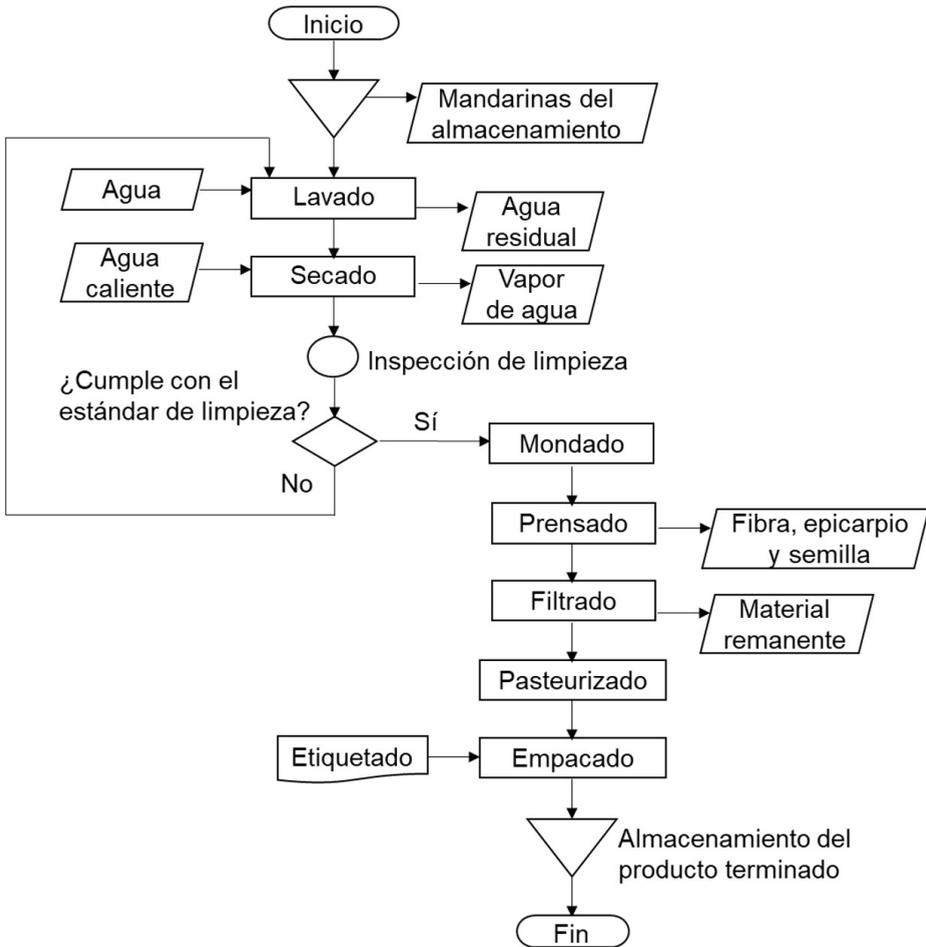
Tabla 1.1. Símbolos empleados en diagramas de flujo de proceso

Símbolo	Significado	Observaciones
	Conector	Indica la necesidad de conectar una parte del proceso con otra.
	Terminal	Indica el inicio o final de un proceso.
	Retraso o demora	Indica una espera dentro del proceso.
	Almacenamiento	Indica que el producto final se ha almacenado.
	Proceso	Indica la actividad que debe ser ejecutada.
	Decisión	Indica una toma de decisión.
	Línea de flujo	Indica la dirección de flujo del proceso.
	Documentación	Indica que se están empleando documentos en el proceso.
	Inspección	Indica que se está realizando un trabajo de control de calidad.
	Datos	Información relevante para el desarrollo del proceso.

Fuente: elaboración propia.

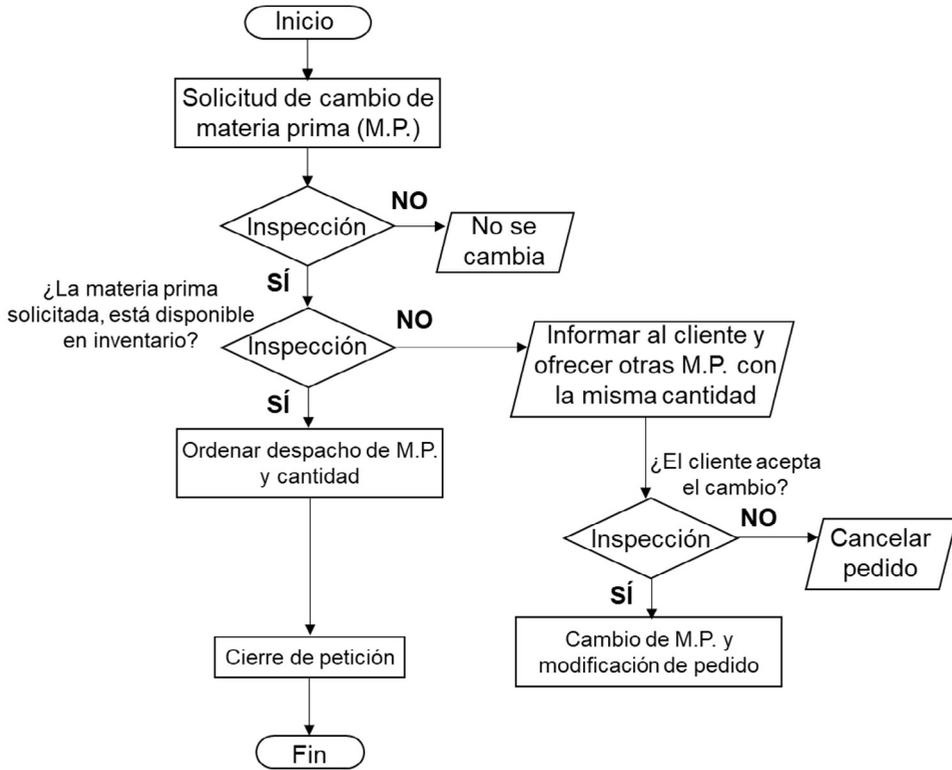
Cuando se diseña un diagrama de flujo de proceso, se deben identificar todos los puntos o etapas involucradas para una mejor toma de decisión. A continuación, se presenta un esquema de un diagrama de flujo, donde se aplican los símbolos enunciados en la tabla 1.1.

Figura 1.3. Diagrama de flujo para un zumo de mandarina



Fuente: elaboración propia.



Figura 1.4. Diagrama de flujo para un producto alimenticio no conforme

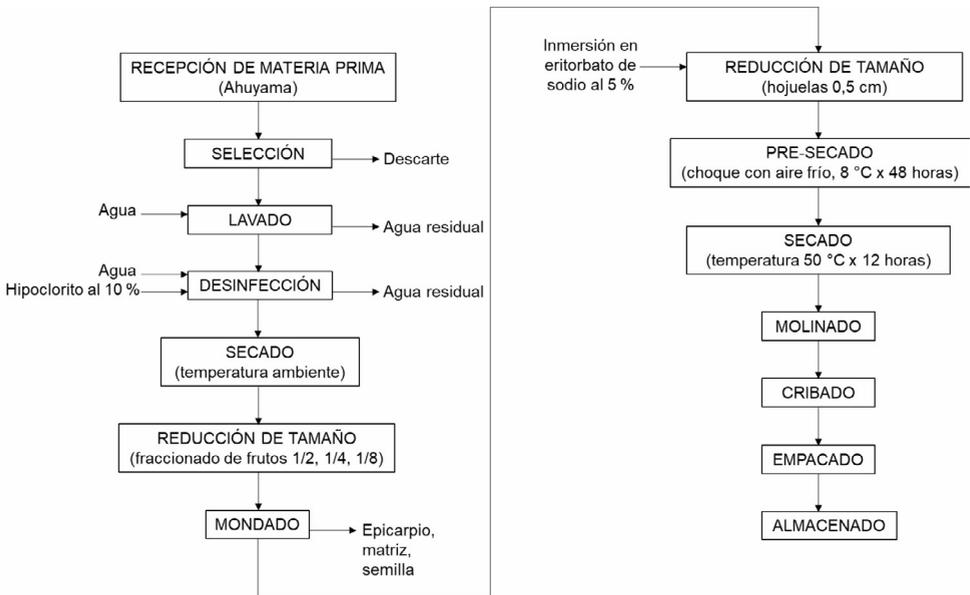
Fuente: elaboración propia.

En las figuras 1.3 y 1.4 se puede apreciar que se emplean los óvalos para indicar el inicio y el final del procedimiento de control del producto alimenticio, los rectángulos representan las acciones en cada etapa, el rombo se emplea para las bifurcaciones de toma de decisiones (sí o no existe) y las flechas indican la marcha del circuito.

Diagrama de bloques de proceso (DBP) es una representación esquemática de la secuencia de operaciones unitarias de un proceso en la elaboración de un alimento (producto) (Cedeño, 2017), los DBP se caracterizan porque cada operación unitaria se encuentra dentro de un rectángulo y debe escribirse preferiblemente en mayúscula (figuras 1.5 y 1.6). También se encuentran las corrientes de entrada, salida e intermedias representadas por flechas, las corrientes de entrada representan todo el material que entra a proceso, las corrientes de salida representan el material o residuo que sale del proceso y las corrientes intermedias representan las conexiones de una operación unitaria a otra. Dentro del rectángulo bajo la operación unitaria,

se puede registrar información contundente que sea vital para el proceso, como son las variables de control o de respuesta, por ejemplo: temperatura, presión, tiempo, entre otras, las cuales dependen del tipo de elaboración, es decir, del tipo de proceso. En el DBP puede registrarse información que determine la cantidad de producto que va a entrar o a salir del proceso, de manera que permita realizar un balance de masa, pero algo sí es claro, no entran ni salen equipos; por ejemplo, para la reducción de tamaño no entra un cuchillo o una tabla, estos elementos están inmersos dentro de la operación unitaria, por tanto, en el DBP lo que se resalta son las operaciones unitarias, las variables de control y las materias primas (figura 1.5).

Figura 1.5. Diagrama de flujo del acondicionamiento del fruto de ahuyama hasta harina

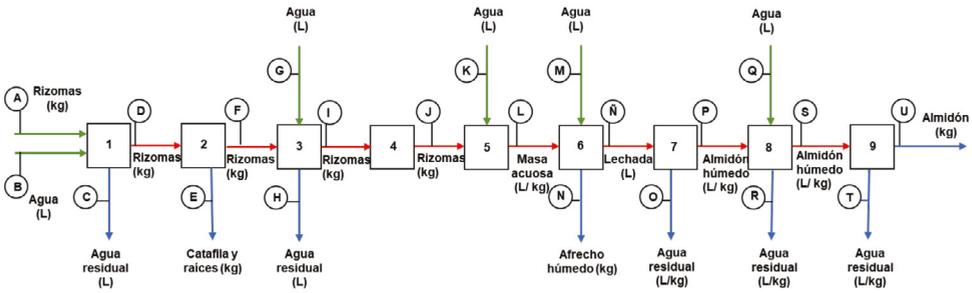


Fuente: Valdés-Restrepo et al. (2023a).

Las corrientes de entrada, salida e intermedias pueden ir acompañadas de letras que indican la trayectoria específica de esa corriente (figura 1.6) y las operaciones unitarias pueden representarse con números cuando el diagrama es muy extenso o involucra la unión de varios procesos; en cualquier caso, se debe especificar el nombre de la operación que representa el número.



Figura 1.6. Diagrama de flujo de la extracción de almidón de sagú (Maranta arundinacea)

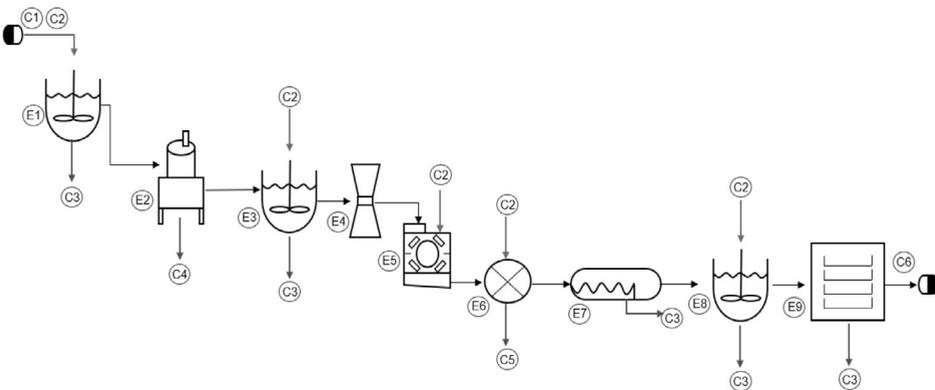


Donde: 1. Lavado; 2. Pelado; 3. Lavado; 4. Reducción de tamaño; 5. Molinado; 6. Filtrado; 7. Tanque de sedimentación; 8. Lavado; 9. Secado.

Fuente: elaboración propia.

Diagrama de equipos de proceso (DEP), es un esquema del proceso productivo representado con equipos (figura 1.7). Se considera un diagrama más profundo que los DFP y DBP, porque se debe tener un conocimiento previo para comprender cada operación unitaria, y saber interpretar los símbolos y equipos presentes en el esquema. Los símbolos y dibujos de equipos se deben hacer lo más sencillos posible para su buen entendimiento.

Figura 1.7. Diagrama de equipos para la extracción de almidón de sagú (Maranta arundinacea)



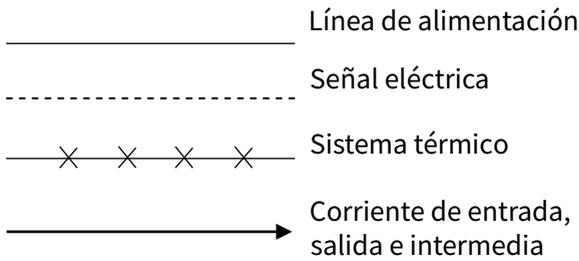
Donde: C: Corriente; E: Equipos; C1: Rizomas; C2: Agua; C3: Agua residual; C4: Catáfila y raíces; C5: Afrecho húmedo; C6: Almidón; E1: Tanque agitador; E2: Pelador; E3: Tanque agitador; E4: Triturador vertical; E5: Molino de martillos; E6: Filtro de aire; E7: Decantador; E8: Tanque agitador; E9: Secador de gabinete.

Fuente: elaboración propia.

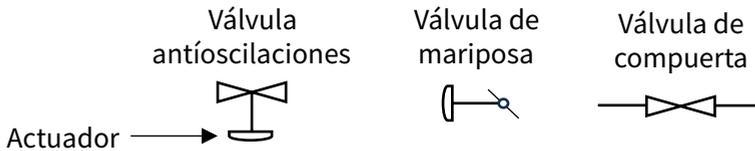


Símbolos más empleados en los DEP: son diversos los símbolos empleados en los diagramas de procesos y de equipos, algunos de los más empleados son los siguientes:

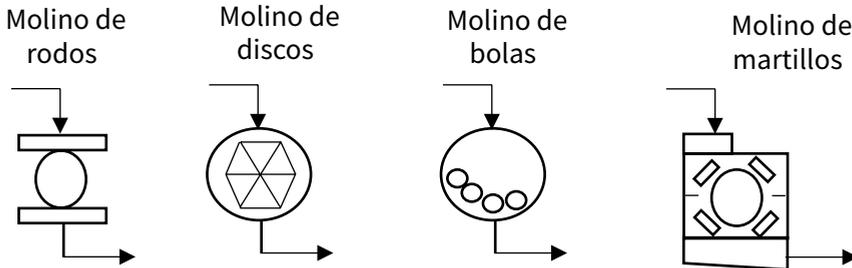
Tipos de corrientes



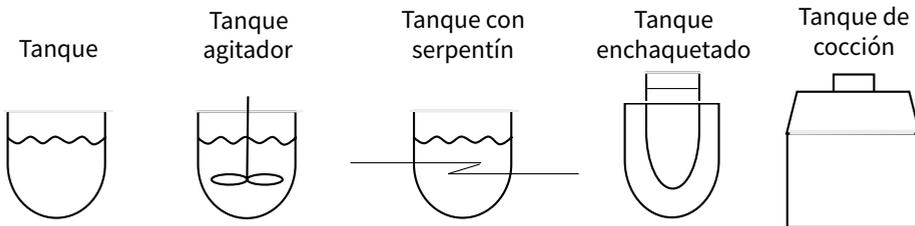
VÁLVULAS



MOLINOS

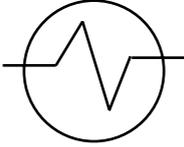


TANQUES

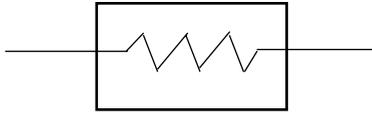


INTERCAMBIADORES

Intercambiador de calor

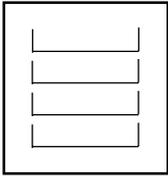


Cambiador de calor de placas

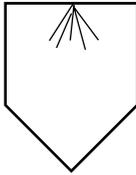


SECADORES

Secador de gabinete

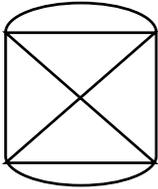


Secador por aspersión

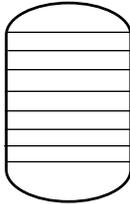


TORRES

Torre empacadora

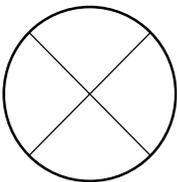


Torre de platos



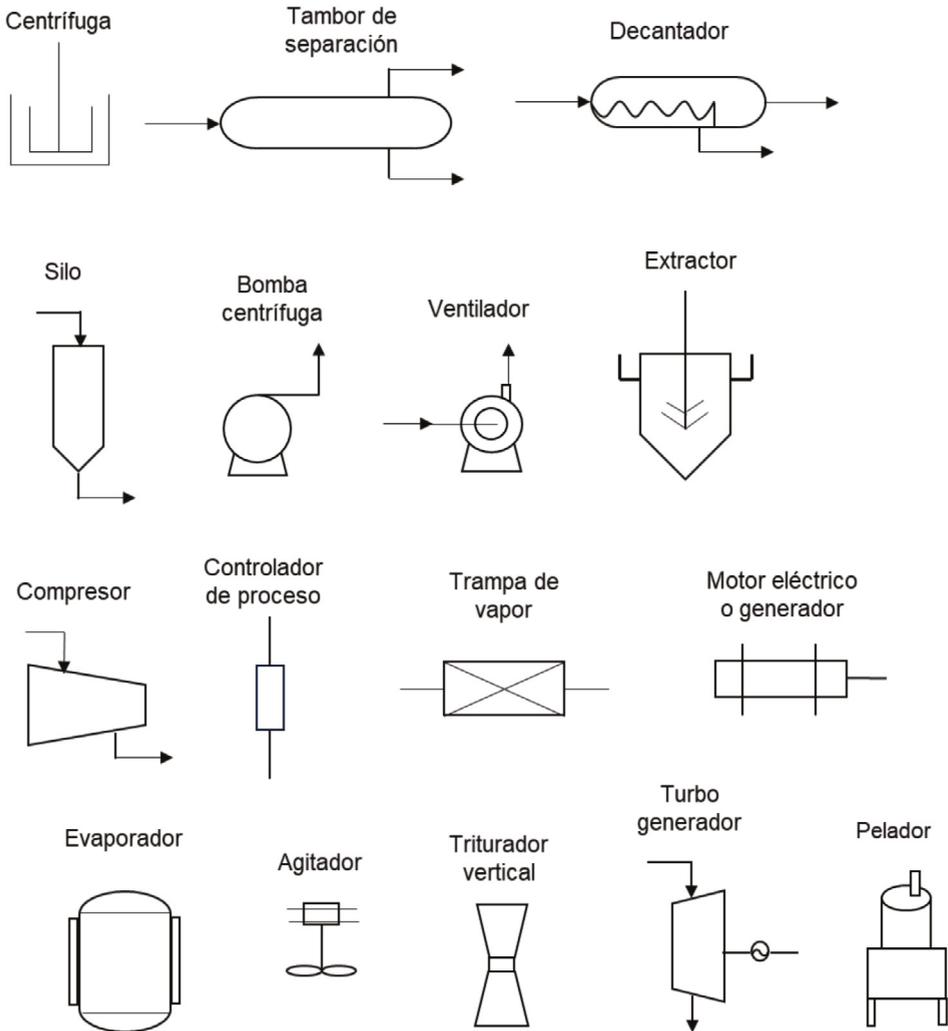
FILTROS

Filtro de aire



Filtro prensa





1.3. Aditivos e ingredientes

Según la Comisión del Codex Alimentarius, un aditivo alimenticio es cualquier sustancia que no se consume normalmente ni se utiliza como ingrediente frecuente en alimentos, la cual se puede adicionar en las fases de fabricación, elaboración, preparación, tratamiento, envasado, empaquetado, transporte o almacenamiento, siendo un elemento que afecta las características del alimento.



Las sustancias que se utilizan para potencializar las propiedades organolépticas se pueden dividir en dos categorías: ingredientes naturales y aditivos artificiales o sintéticos que, según la matriz alimentaria empleada, pueden ser: conservantes, antioxidantes, emulsificantes, potenciadores de sabor, acidulantes, edulcorantes, antiaglomerantes, antiespumantes, espesantes, emulgentes, colorantes, humectantes, saborizantes, entre otros.

Existe una amplia gama de pigmentadores naturales, como frutas, verduras y especias, ejemplo de ellos son: remolacha, zapallo, verduras, arándanos, uvas, etcétera. Entre los conservantes naturales se identifican la sal y el azúcar, cuyo fin es extraer líquido y absorber humedad de los alimentos, además del vinagre, que se ha empleado como conservante y para mejorar la calidad organoléptica. Hay plantas que ayudan a retener el sabor y el color de los alimentos, como el romero, el orégano, el eneldo, el perejil y la albahaca; en los modificadores de sabor y color se encuentran la cúrcuma, el azafrán, el achiote, la pimienta y el pimentón. Los aditivos artificiales o sintéticos son los que se obtienen como resultado de productos no naturales, como ejemplo de ellos se encuentran la mayoría de los conservantes, como ácido de sodio, sorbato de potasio y ascorbato de sodio.

Los números E

La Unión Europea ha asignado a los aditivos números de entre 3 y 4 cifras precedidos de la letra E, que significa Europa, cuyo objetivo es identificar el aditivo, conocer su función, cantidad permitida y denominación química (Sánchez Juan, 2013). El primer dígito indica la categoría del aditivo o el papel principal de cada aditivo, el segundo dígito hace referencia a la familia del aditivo y el resto de dígitos definen o identifican el aditivo.

Clasificación de los aditivos

El Comité de Codex sobre Aditivos Alimentarios y Contaminantes de los Alimentos (CCFAC) ha establecido el Sistema Internacional de Numeración de Aditivos Alimentarios (SIN) (Codex Alimentarios, 2021), que establece la clasificación numérica E (<https://url.unad.edu.co/qqSns>). E1-colorantes, E2-conservantes, E3-antioxidantes, E4-edulcorantes, emulgentes, estabilizantes, espesantes y gelificantes, E5-agentes antiaglomerantes, ácidos, bases y sales, E620 a E641-potenciadores de sabor, E901 a E904-agentes de recubrimiento, E950 a E967-edulcorantes.

El sistema internacional de numeración de los aditivos alimenticios define algunas clases funcionales:

Antiaglutinantes: sustancias que reducen la tendencia de las partículas de un alimento a adherirse unas a otras.

Antiespumantes: aditivos alimenticios que impiden o reducen la formación de espuma.

Antioxidantes: aditivos alimenticios que prolongan la vida en almacén de los alimentos, protegiéndolos del deterioro ocasionado por la oxidación.

Colorantes: sustancias que dan o restituyen el color a un alimento.

Edulcorantes: aditivos alimenticios (diferentes a los azúcares mono o disacáridos) que confieren a un alimento un sabor dulce.

Emulsionantes: aditivos alimenticios que forman o mantienen una emulsión uniforme de dos o más fases en un alimento.

Espesantes: aditivos alimenticios que acrecientan la viscosidad de un alimento.

Espumantes: aditivos alimenticios que posibilitan la formación o el mantenimiento de una dispersión uniforme de una fase gaseosa en un alimento líquido o gaseoso.

Estabilizadores: aditivos alimenticios que posibilitan el mantenimiento de una digestión uniforme de dos o más sustancias.

Gasificantes: aditivos alimenticios utilizados para introducir dióxido de carbono en un alimento.

Gelificantes: sustancias que dan textura a un alimento mediante la formación de un gel.

Humectantes: sustancias que impiden la desecación de los alimentos, contrarrestando el efecto de un escaso contenido de humedad en la atmósfera.

Leudantes: aditivos alimenticios o combinaciones de aditivos alimenticios que liberan gas y, de esa manera, aumentan el volumen de una masa o rebozo.

Secuestrantes: aditivos que controlan la disponibilidad de un catión.

1.4. Actividad del agua y curvas de adsorción y desorción

Actividad de agua (a_w)

Los microorganismos necesitan un medio adecuado (temperatura, pH y agua, entre otros) para crecer y multiplicarse, es por ello que la mayoría de los métodos de conservación, como la liofilización, deshidratación, congelación, evaporación, adición de azúcares y sales, entre otros, buscan reducir la cantidad de agua y alargar la vida útil del producto. Por lo tanto, es conveniente determinar de forma precisa la actividad de agua (a_w) de cada producto, para identificar el riesgo de incorporación en una matriz alimenticia y su vida útil.

La actividad de agua (a_w) y el contenido de agua de un alimento son conceptos relacionados pero diferentes en el campo de la ciencia de los alimentos; la actividad de agua (a_w) mide la disponibilidad de agua para crecimiento microbiano que se encuentra en un producto alimenticio, y se define como la presión de vapor de agua en un alimento dividido por la presión de vapor de agua pura a una misma temperatura (condiciones estándar) (Sicheng et al., 2023), mientras que el contenido de agua o humedad mide la cantidad de agua libre presente en el producto. La a_w tiene valores que van del 0 al 1 y se determinan dependiendo de la composición y contenido de agua libre en el alimento, entre más cercano a 1 sea la a_w , mayor es la cantidad de agua disponible en el alimento y propenso a la multiplicación de microorganismos.

$a_w = 0,98$: pueden crecer microorganismos patógenos y algunas levaduras. Ejemplo: carne, pescado, leche.

$a_w =$ entre 0,93 y 0,97: proliferan los microorganismos patógenos, cuyos alimentos susceptibles son las carnes en general, los embutidos fermentados, quesos de corta maduración y el pan.

$a_w =$ entre 0,85 y 0,92: proliferan bacterias como *Staphylococcus aureus*, que pueden conllevar a la intoxicación alimentaria y algunos hongos pueden crecer en este medio. Ejemplo: embutidos curados, leche condensada.

$a_w =$ entre 0,60 y 0,84: crecen las bacterias y algunos microorganismos osmófilos (microorganismos adaptados a altas presiones osmóticas como altas concentra-

ciones de azúcar) o halófilos (bacterias que pueden sobrevivir en medios con alta salinidad) que pueden aparecer en frutos secos, cereales o quesos.

$a_w < 0,60$: no hay crecimiento microbiano, pero pueden permanecer durante largo tiempo, sobre todo aquellos microorganismos que sobrevivieron durante el procesamiento del alimento. Ejemplo: miel, chocolate, dulces en general y galletas.

Existen diferentes técnicas para la medición de la a_w ; dependiendo de la técnica de medición, el resultado puede ser diferente, por tanto, es necesario establecer las curvas de isoterma de sorción de vapor de agua preferiblemente a la temperatura de almacenamiento, debido a que estas pueden cambiar según el tipo de alimento o producto y su afinidad con el agua.

Medición del contenido de humedad

El contenido de humedad influye en las propiedades físicas y químicas de la materia prima y para su medición se emplean diversos métodos, principalmente se utilizan estos tres: secado, midiendo la pérdida de peso por estufa, secado en termobalanza y la titulación de Karl Fischer.

Método de secado por estufa. Consiste en secar la muestra hasta peso constante; inicialmente se pesa la muestra, se registra el peso y se introduce en una estufa preferiblemente de aire recirculante a 105 °C durante 24 horas, luego se coloca en un desecador y se registra el peso final y por medio de diferencia de peso se determina la humedad presente en la muestra.

Método de secado en termobalanza. Es un método seguro y eficiente que permite evaporar la humedad de una muestra de forma continua y se puede llevar un registro de la pérdida de peso de la muestra hasta peso constante.

Método de Karl Fischer. Es un análisis químico fundamentado en la oxidación del dióxido de azufre mediante yodo en una solución metanólica, además, es un método más de valoración volumétrico que cuantitativo para determinar el contenido de agua en sólidos y líquidos. La muestra que se va a analizar es sumergida en un disolvente que no contenga agua, el disolvente más empleado es el metanol y luego con una bureta se añade el reactivo que contiene dióxido de azufre, yodo y una amida, el agua que contiene la muestra reacciona con el reactivo de Karl Fischer hasta que se consume en su totalidad, quedando el yodo libre en la disolución, la valoración se determina volumétricamente con un electrodo de platino. Existen dos direccio-

nes de titulación: titulación coulombimétrica, para muestras con bajo contenido de humedad es inferior al 1 %, que consiste en titular la muestra con el reactivo de Karl Fischer donde la reacción de oxidación electrolytica provoca la producción de yodo y titulación volumétrica, para muestras con un contenido de humedad moderado o alto, en la cual se agrega a la muestra un solvente libre de humedad y se titula con el reactivo de Karl Fischer.

Medición de la actividad del agua (a_w)

Para determinar la actividad de agua (a_w), se emplean diversos métodos, como métodos isopiésticos (a presión constante), higrómetro de punto de rocío, higrómetro eléctrico, higrómetro de condensación, psicrómetros (termómetros de bulbos húmedo y seco), método de intervalos, entre otros, siendo el higrómetro de punto de rocío el más empleado.

Medida de punto de rocío. Consiste en colocar la muestra en una cámara hermética la cual tiene un espejo que, a medida que pasa el aire sobre la superficie, la temperatura se reduce gradualmente, el espejo se enfría y comienza a condensarse el vapor de agua en la superficie del espejo, y la temperatura a la que el vapor de agua comienza a condensarse se conoce como la temperatura de punto de rocío. Dentro de la cámara, el aire puede enfriarse hasta el punto de saturación sin modificar el contenido de humedad, se dice que se alcanza el equilibrio cuando la humedad relativa y la actividad de agua de la muestra dentro de la cámara son iguales; por tanto, es necesario medir la temperatura a la que se produce la condensación y la temperatura de la superficie de la muestra. Es un instrumento empleado en la industria no solo para determinar la humedad relativa y la actividad de agua, sino para comprobar la crujencia de un producto alimenticio, como *snacks*, papas fritas, pan, galletas, leche en polvo, café liofilizado, frutas liofilizadas y algunas carnes.

Curvas de adsorción y desorción

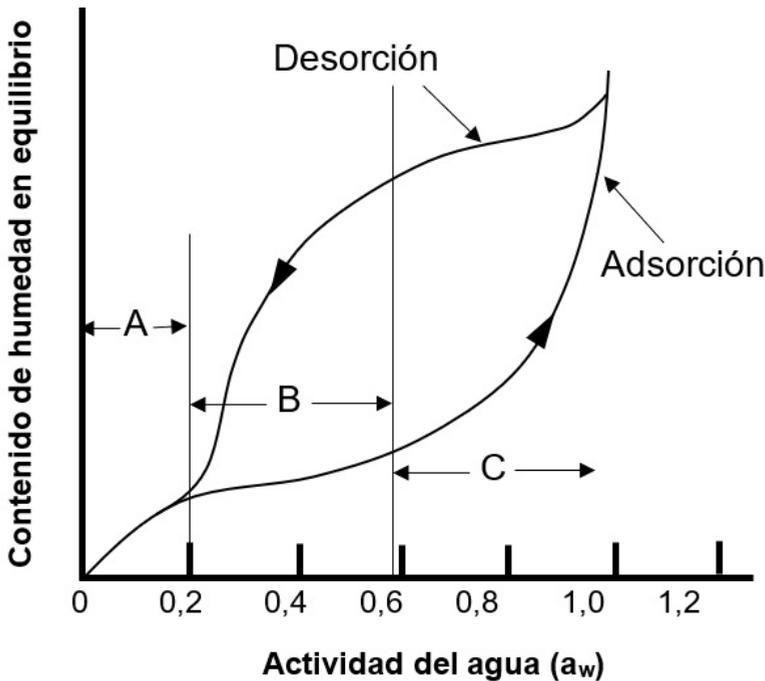
Para una misma humedad relativa hay dos isotermas: de adsorción y de desorción, debido a que el material o producto alimenticio puede presentar un contenido de humedad mayor o menor a la humedad de equilibrio para la condición ambiental presente, fenómeno que se conoce como histéresis.

La isoterma de adsorción de alimentos es una curva para conocer la actividad de agua del alimento a una temperatura determinada según su contenido de agua, es decir, indica la cantidad de agua retenida por un alimento con respecto a la hume-

dad relativa de la atmósfera que lo rodea. A su vez, las isothermas se dividen en tres regiones representadas con las letras A, B y C. En la región A, las moléculas de agua se encuentran ligadas al sólido en sitios específicos, en estos sitios se encuentran los grupos hidroxilo de los polisacáridos y aminas de las proteínas que se unen por medio de puentes de hidrógeno y fuerzas ion-dipolo, a esta zona se le denomina monocapa. En la región B, el agua se encuentra en multicapas. Y en la región C, el agua se encuentra libre. Por tanto, la relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad a una temperatura dada es característica de cada producto y se llama isoterma de sorción.

El incremento en actividad de agua está correlacionado con un incremento en el contenido de humedad, pero no es una relación lineal. Las isothermas de sorción presentan diferentes formas, las cuales van a depender de la composición física y química del producto alimenticio; sin embargo, la mayoría de las isothermas de sorción en alimentos tienen una forma sigmoidea. En la figura 1.8 se muestra la representación de isothermas de adsorción y desorción con relación a la a_w y el contenido de humedad.

Figura 1.8. Isothermas de adsorción y desorción



Fuente: elaboración propia.



Modelos de isotermas

A partir de las isotermas de sorción se pueden determinar los contenidos de humedad críticos en los alimentos y predecir los cambios que se pueden presentar durante el almacenamiento. Para ello, se han desarrollado modelos matemáticos de dos o más parámetros para describir las isotermas de sorción de alimentos. En el área de los alimentos se emplean seis modelos matemáticos: modelo de Brunauer, Emmett y Teller (BET), GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer), Henderson, Caurie, Oswin, Peleg y Smith. Sin embargo, los más empleados son, el modelo de BET, GAB, Henderson y Caurie.

1. **Modelo de Brunauer, Emmett y Teller (BET).** Considera la relación existente entre la humedad y la actividad de agua a_w . Método que determina la cantidad de agua ligada en sitios polares específicos del adsorbente (Anderson, 1946). La limitación se encuentra en que las isotermas se ajustan dentro de un intervalo limitado de valores de a_w (de 0 a 0,55)

$$\frac{a_w}{M(1-a_w)} = \frac{1}{M_1 C} + \frac{C-1}{M_1 C} a_w \quad (1)$$

Donde:

a_w = actividad de agua

M = proporción de agua sobre el extracto seco

M_1 = contenido de agua (sobre extracto seco) de una capa monomolecular

C = constante, característica del material relacionada con el calor desprendido en el proceso de sorción

2. **Modelo de GAB.** Este modelo fue propuesto por Guggenheim, Anderson y de Boer, como una refinación de modelo de BET, donde la energía de interacción de las multicapas es similar a la energía de la segunda capa del adsorbente en el adsorbato, pero diferente a la fase líquida (Guggenheim, 1966). Es una ecuación de tres parámetros, que utiliza para ajustar los datos de sorción de un producto alimenticio, actividades de agua de 0,9.

$$W_e = \frac{W_0 \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot [1 + (C - 1) \cdot K \cdot a_w]} \quad (2)$$

Donde:

W_e = humedad de equilibrio, expresada en kg por cada 100 kg del sólido seco

W_0 = humedad del producto correspondiente al punto de adsorción (punto de saturación)

C = constante de Guggenheim, característica relacionada con el calor de adsorción de la monocapa

K = factor de correlación relacionado con el calor de sorción de la multicapa

a_w = actividad de agua

3. Modelo de Henderson. (Guzman y Zapata, 2018).

$$W_{e=0,01} = \left(\frac{-\log_{10}(1 - a_w)}{10^f} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

W_e = humedad de equilibrio

n y f = parámetros característicos del producto

4. Modelo de Caurie. Se considera un modelo que arroja buenos resultados para muchos alimentos, en el intervalo de $a_w = 0 - 0,85$.

$$W_e = \exp \left(a_w \ln(r) - \frac{1}{4,5 \cdot W_s} \right) \quad (4)$$

W_e = humedad de equilibrio

r = constante característica del material

W_s = contenido de humedad que proporciona la máxima estabilidad del alimento deshidratado durante el almacenamiento

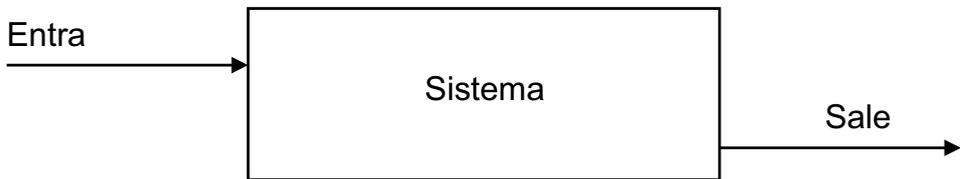


1.5. Materia y energía

Se considera materia, todo aquello que está constituido por partículas subatómicas, es decir, más pequeñas que el átomo y ocupa un espacio, tiene masa (peso, volumen y dimensiones cuantificables), constituida por propiedades físicas y químicas, y puede absorber energía. La materia se puede encontrar en diferentes estados: sólido, líquido, gaseoso, plasma y coloidal. A su vez, la energía es la capacidad para realizar un trabajo, por tanto, el trabajo es un proceso donde se deforma un cuerpo, esta tiene una magnitud física, ya que se puede medir. La energía se puede presentar en diferentes formas: potencial, eléctrica, cinética, mecánica, radiante, térmica, nuclear y química.

La ley de la conservación de la materia explica que la materia no se crea ni se destruye, se transforma. Por tanto, en teoría, en un sistema ideal (figura 1.9), la cantidad total de materia prima que entra en un proceso debe ser igual a la cantidad total que sale. Sin embargo, esta condición difícilmente se da en la realidad; aunque los equipos se enchaquetan para mantener el frío o el calor, siempre hay pequeñas pérdidas de calor o se quedan en los equipos trazas de partículas de materias primas al pasar de una operación unitaria a otra, lo que hace que lo que entra no sea exactamente igual a lo que sale.

Figura 1.9. Sistema ideal que representa la ley de conservación de la materia



Fuente: elaboración propia.

Albert Einstein (1879-1955) mostró que la materia se transforma en energía y la energía puede transformarse en materia. A lo que se le conoce como “teoría de la relatividad” y se expresa con la siguiente ecuación: $E = m \cdot c^2$, donde a un cuerpo en reposo (E) se le puede medir la masa (m) multiplicada por la velocidad de la luz ($c =$ aproximadamente 3×10^8 m/s).

Cuando se habla de procesos, es esencial conocer los fundamentos de los balances de materia y energía, ya que con ellos se determinan los flujos entre operaciones unitarias y procesos.

Pasos generales para realizar cálculos de balance de materia y energía:

1. Leer despacio el enunciado y entenderlo.
2. Graficar el proceso mediante un diagrama de flujo, con las corrientes de entrada, salida e intermedias.
3. Registrar en el diagrama de flujo toda la información entregada en el ejercicio o la información medida, derivada de un proceso de investigación.
4. Convertir todas las unidades de medida en un mismo sistema de unidades.
5. Seleccionar una base de cálculo.
6. Verificar que en cada sistema el número de grados de libertad sea cero.
7. Planear y dar respuesta a las ecuaciones independientes generadas en el balance.

INTRODUCCIÓN A LAS OPERACIONES UNITARIAS EN PROCESOS ALIMENTARIOS

MAIRA FERNANDA RAMÍREZ LASSO

INTRODUCCIÓN

Los ingenieros en alimentos, agroindustriales o afines se fundamentan en la aplicación de diversas operaciones unitarias para transformar materias primas agrícolas en productos finales de alto valor. Las operaciones unitarias, siendo fundamentales para cualquier proceso, se definen como pasos individuales o acciones específicas que contribuyen a la transformación de la materia prima en el contexto de un sistema agroindustrial.

En este capítulo se abordan las operaciones unitarias claves esenciales en estas ingenierías, definiéndolas para su mayor aplicación en la práctica y que sean de ayuda para garantizar la calidad de los productos finales.

2.1. Importancia de las operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos o afines

Las operaciones unitarias desempeñan un papel crucial en la eficiencia y rentabilidad de los procesos en la indus-

tria agroalimentaria. Desde la recolección de materias primas hasta la obtención de productos finales, estas operaciones garantizan la optimización de recursos y la obtención de productos de calidad. Comprender la aplicación y los principios de las operaciones unitarias es esencial para diseñar y gestionar eficazmente los procesos alimentarios.

Principales operaciones unitarias

En este capítulo se abordarán las operaciones unitarias más empleadas en el ámbito de la ingeniería de alimentos o afines. Desde la limpieza y clasificación de materias primas hasta la separación y conservación de productos finales, cada operación desempeña un papel único y esencial en el proceso integral del producto final.

Enseguida se definirán algunos conceptos para entender el contexto de las operaciones unitarias.

Proceso. Es el conjunto de actividades u operaciones industriales que modifican las propiedades de las materias primas para obtener productos que sirvan para cubrir las necesidades de la sociedad. Estas modificaciones a las materias primas naturales pretenden obtener productos más aceptados en el mercado, o que presenten mayores posibilidades de almacenamiento o transporte.

Limpieza. Es el proceso o la operación de eliminación de residuos de alimentos u otras materias extrañas o indeseables (Social, 2013).

Desinfección - Descontaminación. Es el tratamiento fisicoquímico o biológico aplicado a las superficies limpias en contacto con el alimento, con el fin de destruir las células vegetativas de los microorganismos que pueden ocasionar riesgos para la salud pública y reducir sustancialmente el número de otros microorganismos indeseables, sin que dicho tratamiento afecte adversamente la calidad e inocuidad del alimento (Social, 2013).

Almacenamiento. El adecuado almacenamiento y manejo inicial de los insumos constituye un proceso importante para producir y transformar de manera exitosa y sostenible cualquier producto. Este proceso se inicia cuando los insumos se reciben o entregan en el centro de acopio y continúa su almacenamiento, asegurando condiciones óptimas que conserven su calidad y eficacia. Es fundamental mantener controles de temperatura y humedad para evitar la degradación prematura de las materias primas y minimizar las pérdidas.

Este manejo adecuado no solo garantiza la trazabilidad y calidad de los productos, sino que también contribuye a la seguridad alimentaria y a la salud, desde la producción primaria hasta el consumidor final. La implementación de buenas prácticas de fabricación es importante para prevenir riesgos ambientales.

Operación unitaria. Es cada una de las etapas individuales y fundamentales involucradas en un proceso de ingeniería. Estas operaciones son las unidades básicas que conforman un sistema de procesamiento y, por lo general, implican cambios físicos o químicos en los materiales. Cada operación unitaria se realiza de manera independiente y contribuye a la transformación de materias primas en productos deseados (Bartholomai, 1991).

Las etapas en donde se producen cambios netamente físicos se denominan operaciones unitarias y las etapas donde se produce una reacción química se llaman procesos unitarios.

Las operaciones unitarias se dividen en dos grandes ramas: operaciones unitarias difusionales y operaciones unitarias no difusionales.

Las operaciones unitarias difusionales son todas aquellas en donde se establece un equilibrio dinámico entre fases, ya sea líquido-vapor, líquido-líquido o líquido-sólido.

Las operaciones unitarias no difusionales son aquellas en donde no se establece un equilibrio entre fases (Integración, 2018).

Aséptico. Describe una situación de ausencia de microorganismos, incluyendo esporas viables.

Sistema aséptico. Hace referencia a todo el sistema necesario para producir un alimento estéril comercialmente, en el interior de un recipiente herméticamente cerrado. Este término incluye el sistema de tratamiento del alimento y el sistema de llenado y envasado.

Sistema de tratamiento aséptico. Hace referencia solamente al sistema para tratar el producto y llevarlo al sistema de llenado y envasado (Rees et al., 1991).

2.2. Principios físicos y químicos

Las operaciones unitarias son aplicables a muchos procesos, tanto físicos como químicos; por ejemplo, el proceso empleado para la manufactura de la sal común, que consiste en la siguiente secuencia de operaciones unitarias: transporte de sólidos y líquidos, transferencia de calor, evaporación, cristalización, secado y tamizado.

Las operaciones unitarias se basan en principios físicos o químicos específicos; por ejemplo, la destilación, que se basa en las diferencias de puntos de ebullición, mientras que la trituración implica la reducción mecánica del tamaño de partícula (McCabe *et al.*, 1993).

Aplicaciones diversas. Se utilizan en una amplia gama de industrias, desde la producción de alimentos y bebidas hasta la fabricación de productos químicos y farmacéuticos, entre otros. Las operaciones unitarias más comunes en la industria de alimentos son: secado, trituración, filtración, destilación, extracción, evaporación, mezclado, intercambio iónico, centrifugación, adsorción y absorción.

Definiciones de las operaciones unitarias de transformación

Secado. El proceso de secado se presenta como una operación unitaria relevante en la ingeniería de alimentos o afines. La eliminación del agua de productos agrícolas es crucial para prolongar su vida útil, prevenir la proliferación de microorganismos y mantener la calidad organoléptica. Desde granos hasta frutas y hortalizas, el secado se convierte en una fase necesaria para conservar los productos en su forma óptima.

Los procesos de secado pueden cambiar según la procedencia de la materia prima, ya sea sólida, líquida o gaseosa; el secado de materias sólidas se realiza generalmente por un proceso térmico con ayuda de diferentes instrumentos y equipos que comprende no solo la eliminación total del agua (a_w), sino también en algunas ocasiones la eliminación de restos de disolventes. El secado de los gases es un proceso importante y frecuente en la industria química, el gas que hay que secar se reduce a través de un líquido apropiado que retiene la humedad contenida en el mismo o se hace pasar sobre gel de sílice que absorbe la humedad, también por enfriamiento del gas se puede eliminar el agua que contiene. Dependiendo de cómo se encuentre el líquido en el material que se va a secar, el proceso de secado puede realizarse fácilmente o presentar algunas dificultades. Antes de que una materia sólida pueda secarse por medios térmicos, es preciso conseguir un secado mecánico suficien-

te, esto se consigue por diferentes medios como prensado, filtrado o centrifugado, esta previa deshidratación facilita un secado completo.

Las condiciones de secado son muy diversas porque cada sustancia tiene propiedades específicas. La forma y textura del material, eventualmente también la velocidad de corriente del aire seco y su temperatura, son factores que influyen en la velocidad de secado (Vollrath, 2005).

Clasificación de secadores. Se han construido muchos diseños de secadores para crear un eficiente sistema de secado. Para encontrar una clasificación adecuada de los secadores, es necesario definir cómo son suministrados los requisitos térmicos y los secadores con los que se cuenta actualmente. En primer lugar, el calor se debe transferir al material húmedo, para promover la operación de secado.

El calor puede ser aplicado por uno o más de los siguientes métodos:

Convección, donde el calor es transmitido indirectamente por contacto del material mojado y una superficie caliente.

Conducción, donde el calor es transmitido indirectamente por contacto del material mojado y una superficie caliente.

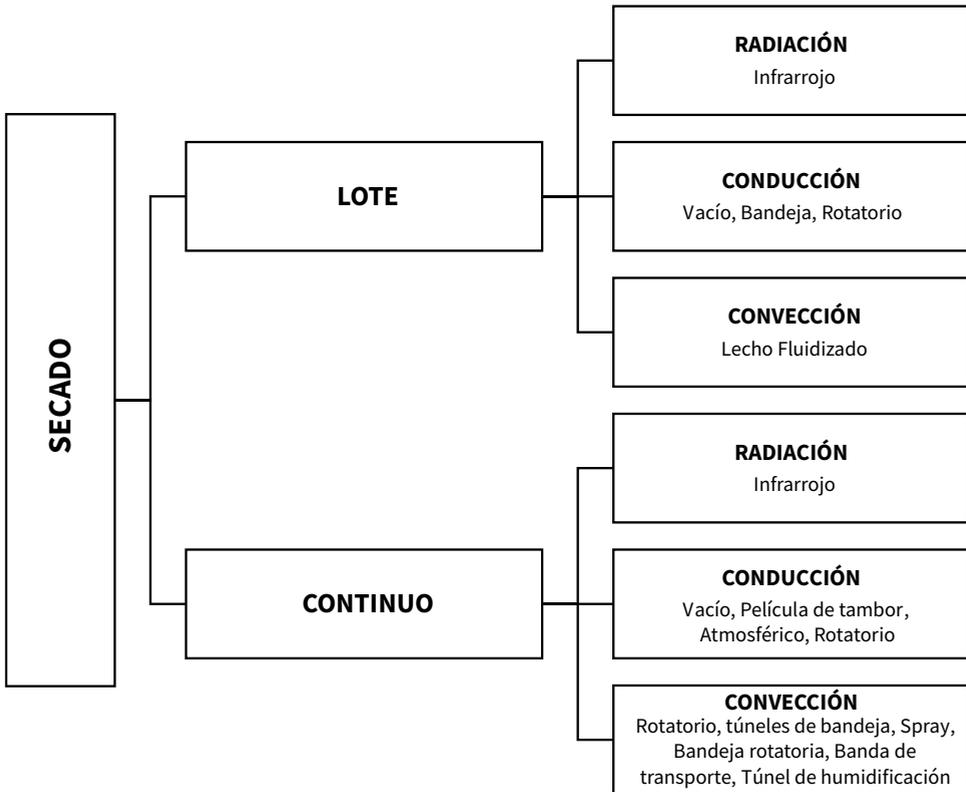
Radiación, donde el calor se transmite directamente y solo de un cuerpo caliente al material mojado, por radiación de calor. Los secadores industriales están en dos categorías principales: secadores de convección y secadores de conducción.

Estos secadores tomarán forma de secadores tipo lote o secadores continuos. En la figura 2.1 se muestran los secadores de la industria según su clasificación (Mazarriegos, 2006).

Las condiciones de secado son muy diversas porque cada sustancia tiene propiedades específicas. La forma y textura del material, eventualmente también la velocidad de corriente del aire seco y su temperatura, son factores que influyen en la velocidad de secado (Vollrath, 2005).



Figura 2.1. Diagrama de clasificación de secadores



Fuente: elaboración propia.

Reducción de tamaño. Se aplica a todas las formas en las que las partículas de sólidos se pueden cortar o romper en piezas más pequeñas. En los procesos industriales, la reducción de tamaño de sólidos se lleva a cabo por distintos métodos y con fines diferentes. Las grandes piedras de un mineral crudo se desintegran hasta un tamaño manejable; los productos químicos sintéticos se muelen hasta convertirse en polvo y las láminas de plástico se cortan en cubos o rombos. Los productos comerciales con frecuencia deben cumplir rigurosas especificaciones con respecto al tamaño y, a veces, con respecto a la forma de las partículas.

Los sólidos pueden romperse con diferentes métodos, pero solo cuatro se usan en los equipos de reducción de tamaño: 1. compresión, 2. impacto, 3. frotación o rozamiento, y 4. corte. Un cascanueces, un martillo, una lima y unas tijeras constituyen ejemplos de los cuatro tipos de acción (McCabe, 1993). La reducción de tamaño es fundamental para convertir materias primas en formas más manejables, es por



ello que operaciones como trituración y molienda permiten obtener partículas de tamaño específico, facilitando procesos subsiguientes como la extracción y la fermentación en la producción de alimentos y bebidas agroindustriales (McCabe et al., 1993).

Filtración. Emerge como una operación unitaria esencial para garantizar la clarificación y purificación de líquidos en los procesos agroindustriales, desde la eliminación de impurezas hasta la separación de sólidos no deseados, la filtración se convierte en un componente vital para garantizar la calidad y pureza de los productos líquidos en cada etapa del proceso.

Envasado en atmósfera modificada (EAM). Es uno de los métodos más usados en la industria alimentaria, que implica eliminar el aire del interior del envase y sustituirlo por un gas o mezcla de gases; la mezcla de gases que se debe emplear depende del producto que se desee trabajar.

La atmósfera gaseosa cambia continuamente durante todo el periodo de almacenamiento, por la influencia de diferentes factores, como respiración del producto envasado, cambios bioquímicos, y la lenta difusión de los gases a través del envase.

Ventajas y desventajas del envasado en atmósfera modificada:

Ventajas:

- Incremento de la vida útil
- Reducción de residuos
- Mejor presentación del producto final
- Mejora el almacenamiento en estanterías (apilado higiénico de los envases)
- Fácil separación de los productos
- Disminuye la necesidad de usar conservantes químicos
- Reducción de los costes de producción y almacenamiento

Desventajas:

- Inversión de maquinaria de envasado con gas
- Coste de los gases
- Inversiones en instrumentos analíticos para garantizar el empleo de las mezclas de gases adecuadas

- Gastos en los sistemas para asegurar la calidad, para evitar la distribución de envases con perforaciones, etcétera.
- Los beneficios del envasado en atmósfera modificada se pierden cuando se abre o se perfora el envase (Parry, 1995).

Envasado en atmósfera controlada. Este método se usa como sinónimo del envasado en atmósfera modificada; pero su empleo es incorrecto, pues no se puede controlar la atmósfera del envase tras cerrarlo.

Envasado en gas. Este es un método alternativo empleado con frecuencia para descubrir el envasado en atmósfera modificada; es un nombre inapropiado, puesto que la modificación de la atmósfera puede conseguirse por un simple vacío o evacuación del aire. También se piensa que puede presentar connotaciones de tipo emocional adversas para el consumidor y, por lo tanto, es un término que evitan muchos industriales y distribuidores.

Envasado al vacío. Este es el método más simple y uno de los más relevantes en la industria alimentaria para la trazabilidad de productos y/o muestras, se basa en modificar la atmósfera interna de un envase. El producto se coloca en un envase formado con *film* de baja permeabilidad al oxígeno, se elimina el aire y se cierra el envase, el envase sin aire se pliega (colapsa) alrededor del producto, puesto que la presión interna es muy inferior a la atmosférica.

Mezcla de gases. Este término es empleado, en ocasiones, para referirse a la mezcla de gases utilizada para modificar la atmósfera dentro del envase (Parry, 1995).

Liofilización. La liofilización es una técnica implementada para conservar productos mediante sublimación, para reducir las pérdidas de compuestos de valor, como los volátiles o termosensibles, por lo que este proceso no altera la estructura fisicoquímica del material, permitiendo conservarlo sin necesidad de implementar cadenas de frío. Este método se define como un proceso de estabilización en donde la materia prima se somete a un proceso de congelación para concentrar el solvente que posteriormente se reducirá mediante sublimación y desorción. Este método se implementa para la deshidratación de frutos como banano, manzana y fresas, entre otros, con el fin de aumentar el tiempo de vida útil del material y al mismo tiempo conservar sus propiedades organolépticas (Ramírez-Navas, 2006).

Evaporación. Un líquido se transforma en vapor añadiendo calor. Este proceso ocurre cuando las moléculas en la superficie del líquido ganan suficiente energía térmica para cambiar a la fase gaseosa.

Cristalización. La cristalización es un proceso mediante el cual ocurre un cambio de fase de un sistema a otro, llevándolo a un estado de desequilibrio; en este proceso, el sistema incrementa el orden pasando de un sistema relativamente desordenado (disolución) a un sistema más organizado (cristal). La cristalización es una operación unitaria que consiste en la formación de una sustancia cristalina a partir de soluciones o de masas fundidas. La operación es muy importante en la industria por la gran cantidad de productos que se venden en el mercado en forma de cristales como el azúcar, también desarrolla un papel importante en ramas como la química, la farmacéutica, la biotecnología y la bioquímica, entre otras (Grases Freixedas et al., 2000).

Mezclado. Es una operación importante, incluso fundamental, en casi todos los procesos químicos. El mezclado de sólidos secos y de pastas viscosas se parece al mezclado de líquidos de baja viscosidad, ambos procesos implican la interposición de dos o más componentes separados para formar un producto más o menos uniforme. Algunos equipos que se usan para mezclar líquidos pueden usarse a veces para mezclar sólidos y pastas, y viceversa (McCabe et al., 1993).

Centrifugación. Es una operación unitaria eficiente para la separación de fases en mezclas líquidas y sólidas. En la ingeniería de alimentos y agroindustrial, se utiliza para la separación de sólidos suspendidos en líquidos, como la extracción de jugos de frutas, mejorando la eficiencia y la calidad de los productos finales.

Esterilización. El tratamiento térmico de los alimentos suele denominarse erróneamente *esterilización*. Es importante reconocer que un producto que ha sido sometido a “esterilización” térmica puede no ser estéril. Si se asume que la destrucción microbiana por el calor sigue un curso logarítmico, la esterilidad absoluta es inalcanzable. El tratamiento térmico consiste en reducir el riesgo de supervivencia; en términos prácticos, sin embargo, es posible reducir la probabilidad de supervivencia hasta en un grado en el que el producto pueda ser considerado como “estéril”.

Esterilidad comercial. Un alimento “estéril comercialmente” puede definirse como un producto que ha sido sometido a un tratamiento térmico tal que no se altere en condiciones normales de almacenamiento ni se considere un peligro para

la salud del consumidor. Por ejemplo, un producto ácido como una fruta puede haber sido sometido a un proceso de pasteurización suficiente para destruir hongos, bacterias y levaduras no esporuladas. Los ingenieros que se encuentran en la transformación de materia prima deben tener cuidado cuando utilizan alimentos ácidos “comercialmente estériles” ($\text{pH} < 4,5$), como frutas para elaborar nuevos productos, por ejemplo, a base de carne, ya que el pH alto puede permitir la proliferación de esporas de microorganismos causantes de intoxicaciones alimentarias que han sobrevivido al proceso de pasteurización aplicado a la fruta. También es importante controlar la alteración en productos ácidos ($\text{pH} < 4,5$), ya que los propios gérmenes de la alteración pueden elevar el pH, permitiendo así que se multipliquen otros patógenos, como *Clostridium botulinum*.

El tratamiento térmico consiste en el calentamiento de los alimentos durante un tiempo y temperatura predeterminados, para conseguir su esterilidad comercial; eliminar microorganismos capaces de provocar intoxicación alimentaria y reducir el contenido de gérmenes alterantes hasta un nivel aceptable. Para un alimento de baja acidez, con un ($\text{pH} < 4,5$), este proceso exige el calentamiento del producto hasta temperaturas superiores a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, generalmente dentro del margen de 115 hasta $130\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante un tiempo suficiente para conseguir una reducción de 12 ciclos logarítmicos en el número de esporas de *Clostridium botulinum*, según se define en el Departamento del *Health Code Practice* N.º 10.

Los tratamientos térmicos pueden aplicarse después de introducir el producto en los recipientes y cerrarlos herméticamente, por ejemplo, mediante enlatado, o en sistemas de flujo continuo antes del llenado aséptico. Un ejemplo claro es el tratamiento UHT (Rees et al.,1991).

Pasteurización. La pasteurización es una operación crucial para la conservación de productos alimenticios mediante el control térmico; en la ingeniería de alimentos o agroindustrial, se aplica comúnmente a productos líquidos como jugos y leche, eliminando patógenos y microorganismos no deseados para prolongar la vida útil sin comprometer la calidad nutricional.

Se presenta un ejemplo de alimento con los temas expuestos anteriormente como el proceso de enlatado de espárragos, que se realiza siguiendo varios pasos. En primer lugar, se hace limpieza y desinfección exhaustiva de la materia prima; luego, se procede a adecuar y clasificar la materia prima óptima para su procesamiento. A continuación, se cortan los espárragos de manera cuidadosa; para preservar la calidad de los espárragos se hace un escaldado que no afecte sus atributos, poste-

riormente, se introducen los espárragos en latas o en otros recipientes que puedan sellarse herméticamente. Es fundamental que los recipientes estén cerrados para garantizar la seguridad alimentaria.

Durante el proceso de enlatado, se asegura un llenado preciso y uniforme de los espárragos, tanto sólidos como líquidos, se procede a llenar los recipientes con salmuera diluida y se sellan herméticamente. A continuación, se someten los recipientes a calor en una autoclave para su esterilización, una vez enfriados, los recipientes se mantienen a temperatura ambiente; luego de secarlos, se etiquetan de acuerdo con la normatividad legal vigente y se almacenan en cajas de cartón (Maluenda, 1991). Es importante destacar que este proceso garantiza la calidad y la seguridad de los espárragos enlatados.

Refrigeración. El enfriamiento se entiende por la reducción de la temperatura de un producto hasta alcanzar entre 0 y 5 °C para conservar los alimentos durante un tiempo corto. El proceso de refrigeración permite la reducción del crecimiento de microorganismos mesófilos y termófilos encargados de la degradación de la materia prima, causando afecciones de tipo organoléptico y su posterior putrefacción (Gigante, 2018). Algunos beneficios del uso de la refrigeración son: prevenir el crecimiento de microorganismos que puedan afectar la salud del consumidor, garantizar las propiedades organolépticas de los productos, minimizar la oxidación de grasas y facilitar el transporte de alimentos perecederos a largas distancias.

Hidrólisis. La hidrólisis es el proceso mediante el cual se lleva a cabo la descomposición de compuestos orgánicos complejos por medio de la reacción química del agua, la cual genera un rompimiento de enlaces con el objetivo de obtener compuestos más sencillos.

Fermentación. La fermentación es un proceso metabólico generador de energía en el cual se transforman los sustratos (compuestos orgánicos), principalmente azúcares, en otras sustancias orgánicas más simples. En el proceso de fermentación, el sustrato da lugar a una mezcla de metabolitos como productos finales del proceso, entre los productos finales se obtienen compuestos como etanol, ácido láctico, ácido acético y ácido butírico, entre otros, los cuales son compuestos de alto valor en la agroindustria para el desarrollo y creación de productos alimentarios y no alimentarios (Carbonero Zalduegui, 1975). En la agroindustria existen diferentes tipos de fermentación, como por ejemplo la fermentación alcohólica, la cual se desarrolla en un ambiente anaeróbico con la ayuda de microorganismos que procesan los hidratos de carbono para la obtención de alcohol en forma de etanol, que pos-

teriormente se emplea en la elaboración de bebidas alcohólicas tales como vino, cerveza y sidra, entre otros.

Ósmosis inversa. La ósmosis inversa es una técnica de separación y purificación mediante la implementación de una membrana semipermeable para eliminar iones, moléculas y partículas. El proceso de ósmosis inversa posee unos de los mayores gradientes de presión dentro de los procesos de filtración por membranas donde esta actúa como barrera para la retención de las partículas y moléculas orgánicas disueltas, permitiendo el paso de las moléculas de agua libres a través de esta, creando un flujo de producto purificado. En el proceso de ósmosis, una de las aplicaciones más reconocidas es la desalinización de agua marina y tratamiento de aguas residuales, donde la eficiencia de este proceso se puede hallar en rangos entre los 95 % y los 99 %, dependiendo de factores como el tipo de membrana, la temperatura y el diseño del sistema, entre otros (Fausto, 2023).

2.3. Operaciones unitarias de transferencia de materia

Las operaciones unitarias de transferencia de materia están guiadas por la difusión de un componente en una mezcla, implicando la transferencia de materia o energía. Por ejemplo, la evaporación supone la transferencia de energía para transformar el estado líquido a vapor (McCabe et al., 1993). Cada operación unitaria tiene un propósito específico dentro del proceso global, ya sea la separación de componentes, el cambio de fase, la transferencia de masa o energía, entre otros. Es por ello que estas operaciones unitarias se consideran entidades independientes, se diseñan y optimizan por separado antes de integrarse en el proceso global (McCabe *et al.*, 1993). Enseguida se describen las operaciones de este grupo.

Operaciones unitarias de transferencia de masa

Las operaciones unitarias de transferencia de masa comprenden procesos fundamentales en los que se busca separar o purificar componentes de una mezcla, mediante el movimiento de materia desde una fase homogénea hacia otra. Este fenómeno ocurre cuando existe una diferencia de concentración entre dos regiones, lo que genera una fuerza motriz que impulsa el desplazamiento de una sustancia.

A diferencia de las operaciones de separación mecánica, como la filtración o la sedimentación, que dependen de diferencias físicas como el tamaño o la densidad de las partículas, las operaciones de transferencia de masa se basan en

diferencias en propiedades termodinámicas como la presión de vapor, la solubilidad o la difusividad. Estas diferencias permiten que una o más especies químicas migren de una fase a otra, como ocurre en procesos como la destilación, la extracción líquido-líquido, la absorción de gases o el secado.

Ejemplo: secado de rodajas de manzana en un túnel de aire caliente.

En la industria de alimentos, el secado es una operación unitaria de transferencia de masa ampliamente utilizada para reducir el contenido de humedad de los productos, con el fin de prolongar su vida útil y facilitar su almacenamiento. Durante el secado de rodajas de manzana en un túnel de aire caliente, el agua contenida en los tejidos celulares migra desde el interior del alimento hacia su superficie y luego se transfiere al aire circundante. Este proceso implica dos etapas de transferencia de masa:

Transferencia interna: el agua se desplaza desde el centro del producto hacia la superficie, impulsada por un gradiente de concentración (alta humedad en el interior, menor en la superficie).

Transferencia externa: una vez en la superficie, el agua se evapora hacia el flujo de aire caliente que circula en el túnel, debido a la diferencia de presión de vapor entre la superficie húmeda del alimento y el aire más seco.

La velocidad de secado depende de varios factores, como la temperatura y velocidad del aire, la humedad relativa del ambiente y las propiedades físicas del alimento (como la porosidad y el espesor de las rodajas). El diseño adecuado del sistema de secado requiere comprender y modelar estos fenómenos de transferencia de masa para garantizar una deshidratación eficiente sin afectar la calidad nutricional o sensorial del producto.

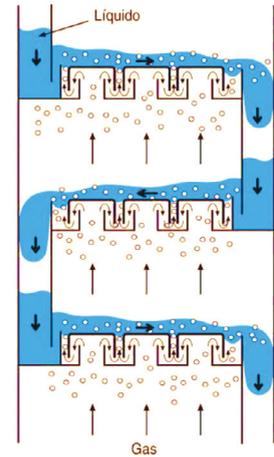
Por ejemplo, el proceso de absorción constituye una operación de transferencia de materia en la que un gas se pone en contacto con un líquido, permitiendo la disolución selectiva de uno o más componentes presentes en dicho líquido.

Absorción de gases. Es una operación unitaria en la cual se disuelve en un líquido uno o más componentes solubles de una mezcla gaseosa. Este proceso se utiliza cuando se desea transferir un componente volátil de una mezcla líquida a un gas. Además, la absorción de gases se emplea como una técnica para la eliminación de gases, llevándose a cabo mediante la transferencia de gas con un líquido. Para

facilitar esta transferencia, se utilizan equipos llamados absorbedores, el procedimiento implica circular el gas mediante un líquido capaz de disolver el agente que se desea separar o con el que se desea reaccionar. Las figuras 2.2 y 2.3 muestran ejemplos de diferentes absorbedores utilizados en la industria.

Figura 2.2. Torre de platos

Torre de platos. La torre está dividida en platos o bandejas perforadas, en el cual el líquido va descendiendo por rebose. El gas circula a contracorriente, burbujando a través del líquido por los orificios perforados. El contacto líquido será mejor cuanto más pequeñas sean las burbujas del gas.



Fuente: McCabe et al. (2019).

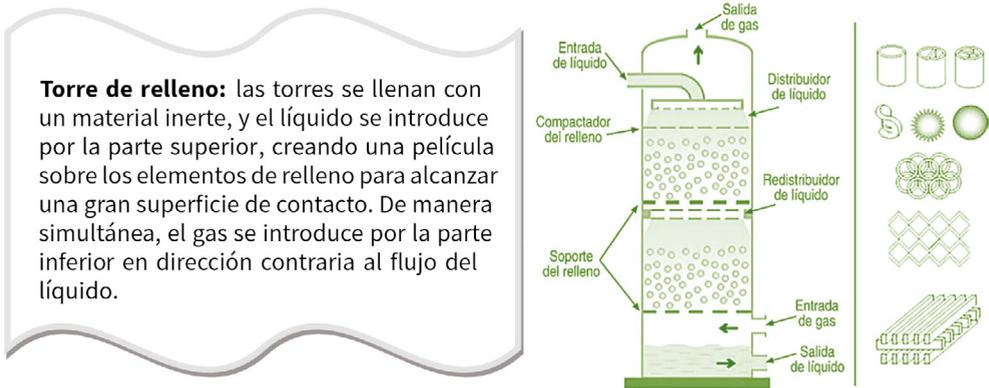
Estas operaciones se realizan de manera continua en equipos llamados torres o columnas, son equipos cilíndricos que suelen ser de gran altura y pueden empacarse o de platos, donde los flujos de contracorriente entre el gas y el líquido se realizan en contracorriente dentro de la torre. La corriente gaseosa se introduce por la base de la columna y sale por el domo, la corriente líquida se alimenta por el domo y se descarga por la base. Para profundizar en el tema, se puede revisar el texto relacionado con las torres o columnas de absorción y sus principales características de los equipos de absorción del libro *Absorción*, de Valiente (2010).

Como se observa en la figura 2.3, el gas de esta columna, que puede ser dióxido de azufre, entra por la parte inferior y atraviesa el relleno, compuesto por un lecho de partículas de tamaño, forma y material determinado; al mismo tiempo se introduce la corriente del disolvente, que puede ser agua, por la parte superior y cae por la gravedad, cubriendo la superficie externa de la partícula de relleno. Esto provoca una amplia superficie de interfaz (mayor contacto entre el relleno, el absorbente y el disolvente, así como flujo turbulento entre ambas fases).



Esta columna de relleno tiene diversos elementos que soporten al absorbedor, como los sistemas de gas y líquido. Incluye una parrilla para sostener el relleno y un separador de nieblas diseñado para capturar las gotas que podrían arrastrar el gas hacia la salida del lecho. Es fundamental destacar que al emplear una torre de aspersión en casos donde el gas es altamente soluble, o una torre de burbujeo cuando el sistema opera en una fase líquida, se logra un control preciso de la velocidad de transferencia de masa.

Figura 2.3. Torre de relleno



Torre de relleno: las torres se llenan con un material inerte, y el líquido se introduce por la parte superior, creando una película sobre los elementos de relleno para alcanzar una gran superficie de contacto. De manera simultánea, el gas se introduce por la parte inferior en dirección contraria al flujo del líquido.

Fuente: McCabe et al., 1993.

Adsorción. Es un proceso que implica la retención de sustancias procedente de la fase gaseosa o líquida en la superficie de un sólido. El sólido, que se llama absorbente, captura la sustancia denominada adsorbato, eliminándola de la corriente; algunos de los materiales adsorbentes usados son: carbón activado, gel de sílice y alúmina. Los sistemas de adsorción pueden clasificarse en dos categorías principales: lecho fijo y lecho fluidizado. El proceso de adsorción, también conocido como sorción, implica la eliminación de uno o varios componentes de un fluido (ya sea líquido o gas), al retenerlos en la superficie de un sólido.

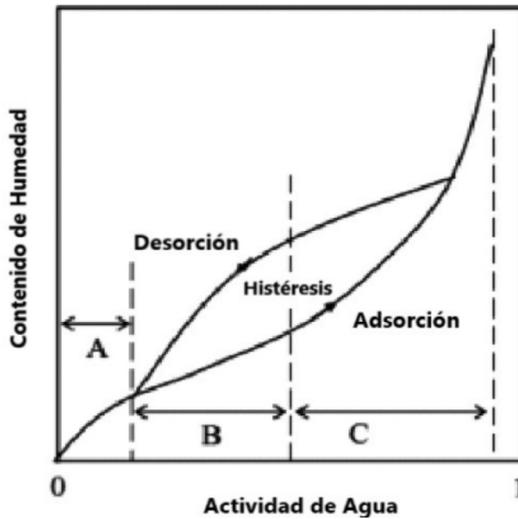
Tipos de adsorción. Según el tipo de atracción entre el soluto y el adsorbente se pueden clasificar en:

- Adsorción eléctrica
- Adsorción por intercambio iónico
- Adsorción de Van der Waals (adsorción física)
- Adsorción de naturaleza química (adsorción química - absorción)

Se citará un ejemplo de isothermas de adsorción de zanahorias deshidratadas. En función del método de obtención, las isothermas se clasifican en adsorción y desorción. En el caso de las isothermas de adsorción, la muestra seca se expone a atmósferas con una humedad relativa superior a su actividad de agua (a_w), promoviendo así la adsorción de agua.

Al contrario, en las isothermas de desorción, la muestra húmeda se coloca en atmósferas con una humedad relativa inferior a su a_w , provocando la pérdida de agua. En ambos casos, el equilibrio se alcanza cuando el peso de la muestra se mantiene constante, no obstante, las isothermas de adsorción y desorción para un mismo producto generalmente no coinciden, y esta diferencia se observa en la figura 2.4, donde la isoterma de adsorción se sitúa por debajo de la desorción, y la región comprendida entre ambas se define como histéresis.

Figura 2.4. Isotherma de sorción típica de un producto



Fuente: Marialina Anria, 2019.

Las isothermas se dividen en tres regiones. La región **A** representa la zona de baja actividad de agua (a_w), donde se encuentra el agua ligada, abarcando tanto el agua estructural como la de la monocapa. Este tipo de agua no es congelable y no está disponible para reacciones químicas. En la región **B**, el agua está unida de manera más débil que en la región anterior y suele encontrarse en pequeños capilares, a esta se le conoce como la zona de a_w intermedia. El agua de la región **C**, identi-



ficada como la zona de alta a_w , es el agua libre que está encapsulada en tejidos y membranas o contenida en macro capilares.

El comportamiento de las isothermas de adsorción es importante, ya que estas garantizan la estabilidad de los productos alimenticios durante los procesos de secado, envasado y almacenamiento.

Intercambio iónico. Es una operación de separación que se fundamenta en la transferencia de materia entre un fluido y un sólido, según lo indicado por Kanchi et al. (2017). En el proceso de intercambio iónico tiene lugar una reacción química en la que los iones móviles hidratados de un sólido son intercambiados por iones de igual carga presentes en un fluido. El intercambio iónico en alimentos es una técnica que implica la sustitución selectiva de iones presentes en la composición de un alimento, usando resinas de intercambio iónico; estas resinas son sustancias sólidas insolubles que tienen grupos funcionales con cargas eléctricas que permiten el intercambio de iones con la matriz líquida en la que están inmersas, como en alimentos o soluciones. Se mencionan varias aplicaciones específicas del intercambio iónico en alimentos, como la deionización del agua, la reducción de contaminantes, el ajuste de acidez y la mejora de la estabilidad, entre otras.

Destilación fraccionada. Es un proceso esencial en la industria alimentaria, especialmente en la producción de bebidas alcohólicas como aguardiente, whisky, tequila, ginebra o vodka. Este proceso permite separar los componentes de una mezcla líquida con base en sus diferentes puntos de ebullición. Durante la destilación fraccionada, la mezcla se calienta y se evaporan los componentes con puntos de ebullición más bajos, luego, los vapores se condensan y se recolectan (Integración, 2018). Para producir bebidas, el objetivo de la destilación fraccionada es obtener un destilado con un alto grado de pureza, eliminando los componentes no deseados, como metanol o los compuestos con olores y sabores desagradables.

Además, la destilación fraccionada también se utiliza en la industria alimentaria para la producción de aceites esenciales, como el aceite de eucalipto o de romero, entre otros, y para la purificación de ciertos compuestos químicos que se utilizan como aditivos alimentarios. La destilación fraccionada es clave en la producción de alimentos y bebidas en la industria alimentaria, ya que permite obtener soluciones líquidas con mayor pureza y calidad superior.

En el campo de la ingeniería es fundamental contar con una comprensión clara y precisa de la terminología utilizada en este capítulo, para describir las corrientes de

materias en diferentes operaciones. En la tabla 2.1 se presenta una recopilación de términos clave relacionados con las corrientes en operaciones de transferencia de materia, que abarca desde la destilación y la extracción, hasta la evaporación y la cristalización.

Tabla 2.1. Terminología para corrientes en operaciones de transferencia de materia

Operación	Fase V	Fase L
Destilación	Vapor	Líquido
Absorción de gases	Gas	Líquido
Separaciones con membrana	Gas o líquido	Gas o líquido
Adsorción	Gas o líquido	Sólido
Extracción de líquidos	Extracto	Refinado
Lixiviación	Líquido	Sólido
Cristalización	Licor madre	Cristales
Secado	Gas (generalmente aire)	Sólido húmedo

*V: vapor *L: líquido

Fuente: McCabe, Smith y Harriot, 2019.

Extracción. Es un proceso por el cual se separa una sustancia o componente específico de una mezcla, usando un agente solvente. Este agente puede ser un líquido, un sólido o un gas, se elige debido a su capacidad para disolver o absorber la sustancia de interés de manera efectiva, la extracción se aplica en diversos contex-



tos, como la ingeniería, la industria alimentaria, la industria ambiental, la industria farmacéutica, textil, cosmética, la industria de papel, entre otras.

Se basa en la disolución de una mezcla (líquida o sólida) en un disolvente selectivo. Estas técnicas comprenden dos categorías, la primera, *lixiviación o extracción sólido-líquido*, se utiliza para disolver materia soluble a partir de su mezcla con un sólido insoluble, la segunda, llamada *extracción líquido-líquido*, se utiliza para separar dos líquidos miscibles utilizando un disolvente que disuelve preferentemente a uno de ellos (McCabe et al., 1993).

La extracción, además, se aplica extensamente en la ingeniería agroindustrial para la obtención de compuestos valiosos, ya sea la extracción de aceites esenciales de plantas aromáticas o la separación de pigmentos naturales, esta operación unitaria juega un papel determinante en la obtención de ingredientes esenciales para la formulación de productos finales. Las extracciones se pueden dividir en dos: hidrodestilación y arrastre por vapor (McCabe et al., 1993).

2.4. Operaciones unitarias de transmisión de calor

Estas operaciones están controladas por los gradientes de temperatura, dependen del mecanismo con que se transfiere el calor, distinguiéndose transmisión de calor por conducción, convección y radiación (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005).

Convección. Los secaderos directos transfieren el calor por contacto del producto con un gas calentado, normalmente aire caliente, la mezcla de gas y vapor obtenida se puede lavar y filtrar si el producto tiene partículas sólidas perjudiciales en suspensión que puedan causar un riesgo a la salud humana y puede perjudicar el medio ambiente. Además, es a menudo ventajoso combinar la molienda con el secado directo en una sola unidad, esto hace ahorrar espacio y reduce el tamaño de las partículas alimentadas al secador, con lo que se optimizan la transferencia de calor y la evaporación.

Conducción. Los secaderos indirectos transfieren calor al producto mediante el contacto con una superficie calentada por aire, vapor o un líquido térmico. Se pueden utilizar intercambiadores para aportar el calor. El fluido, después de evaporar el agua del producto, pasa por un condensador para separar las sustancias evaporadas y se vuelve a calentar para utilizarse de nuevo, realizándose así un circuito cerrado. Las únicas emisiones a la atmósfera son las de los gases procedentes de

los focos de emisión de calor que se emplean en el intercambiador, por tanto, es un proceso de mayor eficacia medioambiental, indicado para productos con sustancias volátiles de alta toxicidad.

Radiación. Este método transfiere energía al material mediante ondas electromagnéticas, principalmente infrarrojos o microondas. Aunque su aplicación a nivel industrial en biomasa no está muy extendida, se emplea en procesos donde la calidad del producto es prioritaria. Sus ventajas incluyen un secado más rápido, calentamiento uniforme, mayor eficiencia energética y un control más preciso del proceso (Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y la Alimentación [CTNC], 2005).

Conclusión

Las operaciones unitarias fundamentales en la ingeniería de alimentos abarcan un papel esencial en la industria, como el secado hasta la extracción y la filtración, son cruciales en la creación e innovación de nuevos productos finales de alta calidad y en la optimización de los procesos productivos. En futuras investigaciones y desarrollos, la comprensión y aplicación efectiva de estas operaciones unitarias seguirán siendo pilares fundamentales para el avance y la innovación en la ingeniería. Las operaciones unitarias son los componentes esenciales de los procesos de ingeniería que permiten la transformación de materias primas en productos finales, mediante la aplicación de principios físicos o químicos específicos.

CARNIZACIÓN

SANÍN ORTIZ GRISALES

INTRODUCCIÓN

A los animales les debemos respeto, en especial porque tomamos sus vidas, y para los que no pueden entender ese aspecto, entonces deben considerar que todo lo que es malo para los animales, es malo para el negocio.

Temple Grandin. Ph. D.

El objetivo de este capítulo es plantear, abiertamente y sin cortapisas, el valor de la carne, desde lo nutricional para los humanos hasta las implicaciones económicas y ambientales de su producción en algunas especies zootécnicas. No sobra advertir que será solo un atisbo, porque sería imposible presumir de redición para saturar todo el campo del saber de la ciencia de la carne.

Pensar en la carne como fenómeno de estudio supone una pausa larga, si es que se desea hacer un texto con enjundia documentada hasta el rigorismo monjil o, caso contrario, hacer un encadenamiento de oraciones con sentido hasta lograr que las acepciones sobre el vocablo “carne” dejen de pasarse peligrosamente en los terrenos inateriales del pecado, para caer suavemente en la más deliciosa materia, que se deriva de la estructura biomecánica que hace de paramento y define algunos seres vivos pertenecientes al reino Animalia, para desembarcar,

obligado, en un gusto sibarita que, quiera uno o no, habrá de transportarle hasta conjeturas metafísicas asociadas al placer, que van más allá de lo entendible o, incluso, bordear los linderos del placer epicúreo y chocar torpemente con el análisis crítico empírico y analítico.

Por salud mental, ora por respeto ecuménico o por ignorancia de las cosas ultraterrenas, se debe dejar de lado la ontología de la carne, para tratar de ingresar en un tópico, digamos, más terrenal en apariencia, pero que requiere, en buena medida, la abstracción de algunos conceptos que van de la biología básica a la biofísica, pasando por la termodinámica y finalizar en los dominios del Prometeo socializante del fuego o en los abrasadores e ígneos aposentos de Vulcano.

Probablemente sin el fuego, la epopeya del ascenso del *homo*, desde ese lejano paleolítico donde la caverna y el fuego fueron sinónimo de hogar, hasta la sofisticada parrilla opulenta que destila sarcoplasma caliente y grasa derretida... no sería lo mismo, quizá diferente, como Oriente, con la locura delirante del concurso diverso de casi todo el reino animal, que en su mayoría arriba palpitante, y en la parrilla chilla, resopla, crepita, traquea, aúlla, silva o se fríe sonoramente en la sartén o en el *wok*. El *ethos* asiático no conoce de prohibición cuando se trata de convertir en comida cuanta criatura del reino animal... y la pregunta es: ¿es en verdad para calmar el hambre?

En alguna parte de este devaneo por la carne, como cosa en sí, al decir de los filósofos, se tendrán que asumir las consecuencias del extremo de las ambiciones, al querer abordar el análisis de las razones y sin razones que tienen los humanos para comer carne, previa carnización o sin ella.

Aunque, dicha sea la verdad, explicar el valor de uso y el valor de cambio de la biomasa animal convertida en carne podría ser un trabajo extenuante, pero no estéril o infinitamente inútil, como el de tratar de hacer entender, con la pedagogía que haya lugar, a esa turbamulta tardomoderna embravecida, que argumenta con fe de carbonero, que la carnización del cuerpo animal (las partes seleccionadas de las especies animales), las vísceras rojas o blancas, el suero sanguíneo, el contenido intestinal, entre otras... es perjudicial para la salud.

Cómo le explica a un esquimal perteneciente a esa cultura ártica inuit o subártica yupik, que consumir la sangre caliente y palpitante o el músculo en vapor humeante de la foca recién abatida, el oso hábilmente lanceado, el narval arponeado... son actos contra natura... y cómo, a la luz de la certeza de la ciencia, se les explica que

manducar sangre, grasa y músculo palpitante de los animales recién sofocados, les ha de matar de pura enfermedad, si justo eso, la captura y consumo en caliente de animales, es lo que han hecho durante miles de años, como parte de su “plataforma instrumental” que, valga la verdad, es uno de los conceptos más bellos emitidos alguna vez por el humanista colombiano y profesor de la Universidad Nacional, Augusto Ángel Maya: “lo único que ha permitido a los hombres llegar hasta los lugares más inhóspitos del planeta es que han logrado constituir una plataforma instrumental llamada cultura”, con la cual los grupos humanos han podido enfrentar lo agreste y adverso del ecosistema, hasta dominarlo y transformarlo de manera drástica. Es, qué duda cabe, esa deriva de la *vita activa* planteada por Hannah Arendt en su esclarecedor libro: *La condición humana*.

Es esa cultura, guiada por la razón de instrumentalizar la *Physis* o Naturaleza, la que convierte a los animales en parte fundamental de la existencia humana al integrarlos en su visión utilitaria del mundo. En la figura 3.1 se observa la relación entre los animales que medran en el ecosistema y los habitantes humanos del círculo polar ártico. Sobra decir que la caza tiene objetivos multipropósito: carne, sangre, huesos, dientes, tripas para hacer sogas, pelos para hacer fieltros, pieles enteras y piqueladas, en un extenso uso de todos los recursos hasta el simbolismo espiritual de Tótem.

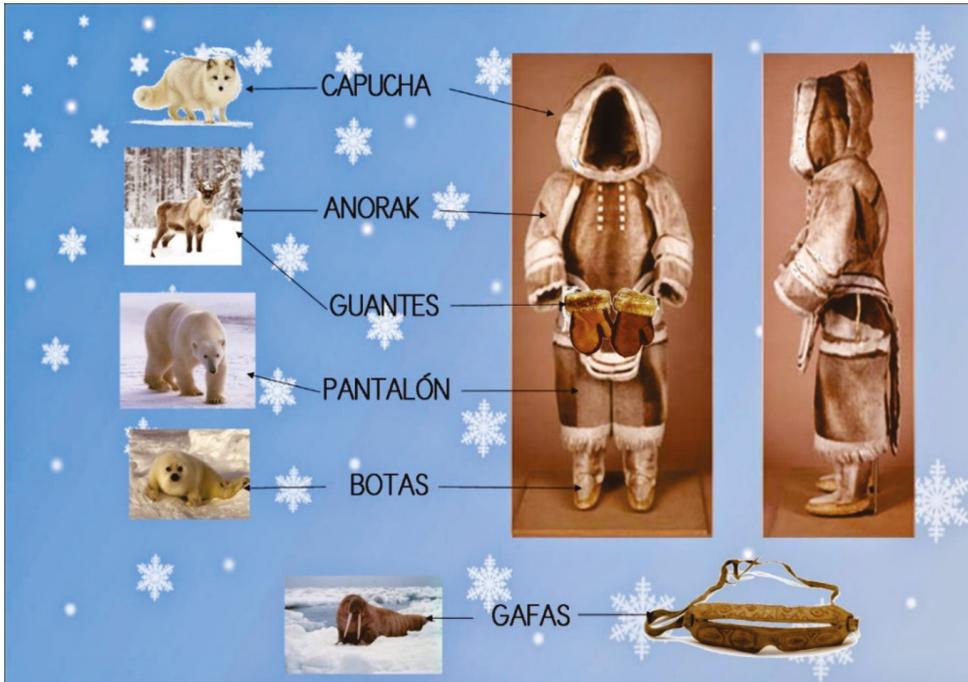
Y ahora, de buenas a primeras, llegan los señoritos satisfechos, de una cultura global tardomoderna, aplastados por las megalópolis, saturados del aburrimiento de la soledad que produce la aglomeración... salen perplejos a declarar que para los humanos todo derivado de origen animal es materia tóxica y, ¡válgame Dios!, tienen audiencia en la naciente industria del sustituto de la carne.

Los argumentos son de una ignorancia absoluta, porque advertir de la toxicidad de la carne, por ejemplo, para los habitantes de Alaska y, que en venganza, deben cambiar la dieta proteica por algas cosechadas de las aguas de la bahía de Valdez, en Alaska, es un desafuero en todo sentido, en especial, después del derrame de 37 mil toneladas de crudo vertidas por el tanquero Exxon Valdez... hoy, luego de más de treinta años del derrame fatal, no se puede comer ninguna especie animal o vegetal y no es por la acumulación de ácido úrico o por la defensa de los animales, es simplemente porque las aguas del mar de Valdez están tan contaminadas de chapapote como en el aciago día cuando se partió en dos el Exxon Valdez.

Comer carne de especies silvestres, por ejemplo, en el fondo de la jungla en Roraima (si es que Bolsonaro y su nefando legado dejaron algo de jungla), ya sea de la

fauna acuática, arborícola, de las profundidades del subsuelo, anfibios, serpientes, saurios o quelonios y miles de insectos en sus diferentes instar, no son más que el resultado de las culturas silvícolas. Las críticas occidentales son solo comentarios al margen.

Figura 3.1. Cinco especies asociadas con la vida en el Ártico



Nota: El bien fundamental no se describe en la figura, pero es obvio y natural que la carne, grasa, vísceras y sangre con los bienes más apreciados derivados de los animales polares

Fuente: Historia de la moda (2018).

Los derivados del cuerpo de los animales, ya sean fluidos corporales, músculos, vísceras rojas o blancas, piel, plumas, patas o huesos, han cumplido un papel crucial en el desarrollo de esa plataforma instrumental llamada cultura, en cada rincón del planeta. En África subsahariana, por ejemplo, los bovinos, las cabras y los burros, antes de convertirse en fuente de carne y pieles, son aportadores de sangre y leche *in vivo*, que mezcladas con féculas de mijo blanco (*Pennisetum glaucum*) conforman una dieta equilibrada, no sobra advertir que con una cocción rigurosa.

Porque el fuego, para lograr una cocción efectiva, es la clave para poder liberar el valor energético y proteico encarcelado dentro del músculo y, más que nada, la energía acumulada en la grasa de los animales. Ya hace años, Marvin Harris, en su emblemático libro *Bueno para comer*, advertía el valor de la grasa animal como moneda de compensación a la hora de cazar. De manera que, la caza supone lograr presas que den una compensación energética a la cantidad de horas hombre empleadas en la faena de la caza, y si se trata de grandes animales, donde el proceso debe ser colectivo, la razón de rendimiento energético se hace mayor.

Es probable que, con el tiempo, no se sabe cuándo, la comunidad global logre superar las taras de los fundamentalismos y se constituya una sociedad planetaria (quizá eusocial) que, por razones ambientales, éticas o morales, puedan crear unas condiciones científico-técnicas, que logren replazar en su totalidad los aportes de nutrientes derivados de la carne, por análogos de biosíntesis en biorreactores de alto desempeño. Eso sería una verdadera revolución que alejaría a los humanos de esa dependencia del planeta, de los animales (su más caro sustento), pero hasta que se logre, los humanos seguirán comiendo y disfrutando de la carne de las diferentes especies animales.

En el paleolítico o en las culturas que aún se mantienen en sus estadios más primitivos de desarrollo, la carne carecía de una definición categórica (solo bastaba ver esa criatura ya establecida en los aposentos del cráneo como cosa comible: el mono en las alturas al lanzar sus chillidos eróticos; el cerdo silvestre al galope entre los matorrales; el venado en celo, silbando bajo el peso inapelable de la testosterona; los pavos delatándose a sí mismos en una respuesta sonora; los peces al platear en las albuferas; los burros y los garañones en un cortejo equino interminable sin pudor alguno por la estepa...) y, entre la captura y el consumo podrían pasar horas y hasta días. Sin la costosa y obligada cadena de frío de hoy día, ya pueden imaginar los lectores cuántos episodios de intoxicación zoonótica han pasado desde que el hombre sabe cazar con herramientas. Caso contrario, los humanos desarrollaron sistemas alterno y facultativo de tolerancia a las toxinas bacterianas (como se nota en la India, donde la comida callejera se elabora sin profilaxis alguna, se sirve en el suelo sobre pavimento, se come con la mano y se evidencia un minimalismo que puede ser más arraigado en otros momentos del desarrollo humano), que quizá hoy día, gracias al apoyo tecnológico y a los adelantos en sanidad, se han perdido.

Ya está costado el logro de la caza, en primer lugar, no es más que un juego de inversión de unidades energéticas gastadas para adquirir en solitario o en colectivo,

una suma mayor de energía, donde el resultado final, gústele a uno o no, es el animal exánime. Ahora el proceso para llegar hasta poder comerlo supone más tecnología y gasto energético, sumado en las artes del destripado, desuello y destazado. Todo ese “manoseo” trae como consecuencia la contaminación reciente, sumado al deterioro natural y daño parcial o total de la caza (no sabemos cuántos humanos ha matado la carne deteriorada), donde el fuego ingresa como eliminador de carga bacteriana y como igualador de la biomasa cárnica, hasta niveles comibles “bioseguros”, ya no como carne diferenciada (mono, puerco, zorro, pescado, culebra), sino como una “cosa cocinada”, que más tarde dará origen a platos de diferente factura, delicados y de entrañable recordación infantil, para los propios y, ¡ay de mí!, una bazofia incomible para los algarivos.

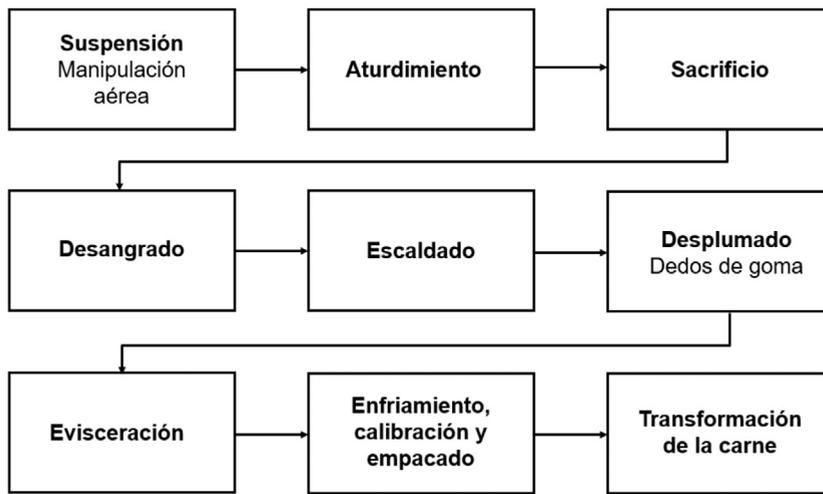
El segundo es la toma de características organolépticas particulares. Por ejemplo, los sabores y aromas de las piezas derivadas del cerdo, saladas (la sal aparece como una tecnología que ha perdurado durante miles de años), curadas y ahumadas (no había frío para conservar), habrían de construir unas características (fragancia y sabor = *flavor* que llaman los entendidos afrancesados) que permiten identificar toda una cultura: la cultura de la península ibérica, que gravita en el cerdo pata negra que, sin duda, ya han ganado en la dehesa el mayor valor producto de su alimentación con base en hierbas, flores, entomofauna del suelo como lombrices, caracoles, miriápodos, etcétera, raíces durante todo el año, y de bellotas *quercus*, propios de los climas mediterráneos, entre los que se encuentran encinas, robles y alcornoques.

Las especies animales correctamente criadas y mantenidas bajo las reglas de la zootecnia se consideran aptas para ser procesadas, hasta el final feliz de disponer de una biomasa nutritiva y biosegura: la carne. Eso es ahora, que todo está bajo una burbuja tecnológica. Sin embargo, se hace regla general dar por tan popular y sentado, que la carne está ahí, que olvidar su origen, especie, naturaleza de ave... para verlo solo como una cosa que gira en ese carrusel del asadero o aparece empacada con fiereza industrial en cajas de cartón, aluminio y plástico, acompañados del rostro inmaculado el coronel Harland Sanders. Todo un atentado a la seguridad planetaria con cada pollo que el populacho engulle.

Valdría la pena detenerse a pensar por un momento de dónde llega ese pollo de las grandes superficies, por lo menos, qué ha pasado para que sea seguro, en este mundo de masas hiperinformadas pero ignorantes en lo conceptual.

En la figura 3.2 se puede observar la cadena tecnológica para lograr una correcta carnización del popularísimo pollo. No se harán esfuerzos por pensar en las fuentes de contaminación en el galpón de la granja (amonio acumulado en el ambiente, antibióticos, anticoccidiales, promotores del desarrollo, y no se sabe qué más), se aceptará que la zootecnia y sus reglas se cumplieron.

Figura 3.2. Esquema que representa los pasos sucesivos desde el sacrificio de aves hasta la producción de carne y las rutas de contaminación asociadas



Fuente: Rouger et al. (2017).

Después del transporte, las aves se suspenden de la cadena transportadora camino al interior de la planta de proceso (PP) y luego se aturden, insensibilizan y degüellan; después del sangrado, las aves se escaldan en agua caliente a una temperatura que oscila entre 50 y 60 °C para aflojar los folículos y dejar libres las plumas. A continuación, se despluman mecánicamente las aves escaldadas; en la PP a gran escala, las plumas se eliminan, utilizando dedos de goma giratorios y luego los cuerpos reciben un lavado por aspersión antes de la evisceración. La evisceración se puede realizar mediante aspiración mecánica o manualmente, después de abrir los canales, en esta etapa también se recuperan la molleja, el corazón y el hígado. Luego los canales se enfrían, ya sea por inmersión en agua fría o por enfriamiento al aire. Los pasos de transformación posteriores incluyen el corte, el deshuesado, el triturado y el uso de diversos tratamientos para el almacenamiento de productos cárnicos, como marinado o adición de diferentes ingredientes (sal, especias) en productos procesados, como salchicha (Rouger et al., 2017).

A partir de la llegada del camión con los pollos a la PP, intervienen otras personas, que se espera estén entrenadas para causar el mínimo de dolor. Pillar el pollo y colgarlo de las patas en la cadena causa un aleteo que libera todas las excrecencias que trae el animal, el ambiente más sucio de la PP es el planchón de recepción. Lo más grave, que tampoco se advierte en el texto, es el daño físico (está de moda el daño colateral) que los pollos sufren en las puntas de las alas. El dolor se refleja en las puntas de las alas con edema, sanguinolentas y con daño hasta del 100 %.

Es extraño que la industria no le ponga cuidado a ese asunto, si las alitas de pollo es un vendible popular convertido en plato costoso y de élite bobalicona (*Honey BBQ Chicken Wings*) y un listado extenso de avisos con nombres en inglés para descres-tar. De niño, en la hacienda donde trabajan los labriegos, una alita para los niños de la casa grande era una ofensa; para los peones, era una delicadeza deliciosa. Los tiempos cambian.

El autor de la figura 3.2 omite las fuentes de contaminación a la hora de hacer de-güello; sin embargo, se deben tener en cuenta las hojas cortantes de la máquina o del operario, con la que se corta la yugular del pollo. Si pasa un animal contamina-do, el resto de aves que pasen luego también estarán contaminadas, siempre que entre lavado y lavado de la cuchilla pasan una buena cantidad de cuellos.

En la poza de escaldado se sumergen los cuerpos emplumados guindados de las patas, y el tiempo del recorrido de la cadena con las aves hasta las patas cubiertas de agua caliente se torna en la fuente de riesgo más alta, pues hay sangre, mocos, contenido del buche y excrecencia sólida, que forma con facilidad un lodo conta-minante (temperatura, humedad, sólidos ricos en nitrógeno, azúcares y minerales, todo un menú a placer para las baterías contaminantes).

En la máquina de desplumado, el riesgo se asocia con la desgarradura de la piel asociada con la velocidad de la máquina y la contaminación de los dedos de látex. Y llega el cuello de botella más crítico: el eviscerado. En el tracto gastrointestinal de pollo (así los pollos hayan ayunado) hay material sin digerir y, claro, excrecencia sólida. Como sea (a mano o con máquina), la probabilidad de ruptura es la amenaza prevalente.

En el *chilling* que fue ideado para suspender toda actividad biológica asociada con la temperatura, la canal del pollo baja hasta 4 a 8 °C, una temperatura aceptable para estabilizar el peligro de contaminación. Lo que no se dice, no hay para qué, es que la canal caliente a 38 °C, al entrar en contacto con la masa de agua con hielo

finamente picado (más área de contacto), captura agua fría en cantidad alarmante, y la canal gana peso, y la industria lo sabe, pero nunca han hecho nada para rectificar ese fraude.

Finalmente, la canal del pollo afortunado, llegó a su etapa final, donde lo deben empaquetar pero que, antes de empaquetarlo, lo pasan por una máquina que inyecta soluciones diversas según sea el objetivo (fosfatos, sodio, sales de curación) y se le añade más peso. Queda pues advertido el consumidor de pollo: hay dos pasos donde la carne de pollo es dañada de manera fraudulenta, metiendo agua y soluciones que aumentan el peso.

El sector de la carne de pollo tiende a ofrecer productos listos para el consumo, que son seguros para el consumidor y tienen una larga vida útil. Los peligros biológicos asociados con la producción y el consumo de carne de aves de corral han sido bien identificados, clasificando a *Campylobacter* spp. y *Salmonella* spp. como un alto riesgo. En dicha clasificación se tuvo en cuenta la gravedad de las enfermedades causadas por estos patógenos, su impacto en la salud humana, el número de casos y la ocurrencia del riesgo en la cadena de producción de carne de aves. En consecuencia, se ha investigado el impacto de diversos tratamientos (temperatura, tratamiento químico, adobo o procesos de conservación) en la reducción de patógenos. También se han realizado muchos estudios con el fin de probar dichos tratamientos para extender la vida útil y evitar el deterioro.

La gran cantidad de publicaciones dedicadas a la microbiología de la carne de aves y la variedad de resultados resaltan la amplia diversidad del estado microbiológico de los productos cárnicos de aves.

Las cargas bacterianas varían (log UFC/g) para cortes similares, almacenados en condiciones similares. Hasta la fecha, la ecología microbiana de los productos cárnicos de aves se ha considerado principalmente mediante métodos culturales, que pueden introducir un sesgo debido a la relativa selectividad de los medios utilizados. En particular, se han utilizado medios poco selectivos dirigidos a grandes familias de bacterias como LAB o Enterobacteriaceae, lo que lleva a una mala caracterización de las especies bacterianas presentes. Los estudios destinados a evaluar el deterioro y la vida útil de los productos han utilizado diversos criterios, que dificultan describir claramente qué bacterias pueden estropear la carne de ave y en qué condiciones, excepto en el caso de las aves marinadas.

De hecho, los adobos que aportan azúcar y ácido acético conducen a una selección de presión sobre la diversidad bacteriana, incluidas las bacterias responsables del deterioro, con la identificación de las funciones bacterianas implicadas en la aparición del deterioro. En cuanto a los patógenos, la mayoría de los esfuerzos se han centrado en rastrearlos, mientras que solo unos pocos describen su comportamiento en la matriz cárnica y consideran la microbiota cárnica. Entonces, se pueden distinguir dos enfoques: uno que se centra solo en una o unas pocas especies, en su mayoría patógenas, prestando poca atención a la microbiota, debido al bajo nivel de contaminación de los patógenos con respecto al total; y otro, centrado en una gama más amplia de microbios, pero evaluando la microbiota con técnicas que inducen un sesgo en la identificación o que son generalistas debido a los medios utilizados.

Un tercer enfoque, ya utilizado para investigar entornos complejos, ha aparecido recientemente en la microbiología de los alimentos y tiende a estudiar la microbiota mediante métodos no culturales. La ventaja de este último es una mejor descripción de las especies bacterianas presentes en la carne de ave, independientemente de la detección de patógenos que suelen estar presentes en un nivel inferior. Finalmente, aunque se ha identificado el tracto gastrointestinal de las aves y las instalaciones de sacrificio como los principales reservorios del origen de los contaminantes de la carne de aves, hay poco conocimiento sobre el flujo de microbiota a lo largo de la cadena de producción desde los animales hasta los productos finales.

Será necesaria la combinación de enfoques de secuenciación de alto rendimiento con métodos culturales altamente selectivos a lo largo de la cadena de producción para evaluar las fuentes de contaminantes de la carne, su identificación y su dinámica durante el procesamiento y almacenamiento. Además, la metatranscriptómica también puede ser útil para determinar las funciones metabólicas expresadas por contaminantes bacterianos durante el procesamiento y almacenamiento de la carne. La combinación de esto con la metabolómica debería desentrañar el complejo comportamiento de los contaminantes de la carne de ave a lo largo de la cadena de producción de alimentos. Esto debería ayudar a gestionar mejor los ecosistemas cárnicos y mejorar la calidad microbiana y la seguridad de los alimentos.

La carne de pollo es una de las más nutritivas (tabla 3.1) y, gracias a los adelantos de la zootecnia, logró alcanzar un estatus inesperado para la primera mitad del siglo XX. Es la concurrencia de los efectos impresionantes del saber fundamentado por Mendel. La genética básica y aplicada supuso un impulso impensable en el mejoramiento vegetal (mejores líneas de maíz, sorgo, soja, arroz, centeno, trigo) y mejores

líneas de pollos parrilleros y gallinas ponedoras. A Mendel le debemos el que haya abundancia en la mesa de los humanos. Que el sistema económico no permite una mejor distribución, eso ya es otra historia.

Cuando se va al supermercado y se ven diferentes tipos de carne, siempre nos asalta una duda: ¿qué carne es más sana?, normalmente esto se suele ver en la cantidad de ácidos grasos saturados que tiene, aunque quizá esto no sea una razón para desechar esa carne para siempre. En la tabla 3.1 se observa que la carne de ternera suele ser la más grasa y calórica, aunque en este caso se ha elegido la semigrasa, que es la más habitual de consumo. No obstante, todo depende de la parte del animal de donde proceda la carne.

El lomo del cerdo y la carne de pollo andan a la par, al contrario de lo que se suele pensar en un principio, ya que la carne de cerdo, en la mayor parte de casos, pierde frente al pollo. Lo único en lo que se diferencian un poco es en los ácidos grasos poliinsaturados y el colesterol, sacando aquí ventaja el lomo del cerdo.

Tabla 3.1. Comparación nutricional de carne de cerdo, ternera y pollo

Contenido	Lomo de cerdo	Ternera semigrasa	Pollo filete
Energía kcal	98,0	256,0	112,0
Proteína g	20,0	16,7	21,8
Grasa g	2,0	21,0	2,8
AGS g	0,90	7,77	0,84
AGMI g	1,10	8,79	1,13
AGPI g	0,65	0,75	0,38
Colesterol mg	58,0	65,0	69,0

AGS: ácidos grasos saturados; AGMI: ácidos grasos monoinsaturados; AGPI: ácidos grasos poliinsaturados

Fuente: Adaptado de Standnik (2024).

En todo caso, esto no tiene que marcar la elección de una carne porque, como vemos, las diferencias no son abismales, al final es el tipo de cocinado o preparación para la carne lo que la hará más o menos saludable, por eso el consejo es ir alternando diferentes tipos de carne y no quedarse en una elección, porque cada una aportará diferentes minerales y vitaminas y, como sabemos, en nutrición la variedad es la mejor elección.

A las alturas de este garrapateo, se ha hablado de bioseguridad y calidad de la carne de animales sanos. Se ha dicho que el valor de la carne es tanto un valor material como un valor cultural. Sin embargo, se viene la locura planetaria del calentamiento global y, de paso implica de manera grave a una de las fuentes de proteína animal más representativa: la carne de bovinos. En Occidente no existe fuente nutricional más representativa que la carne de res. Define nutrición, estatus, poder económico y hasta vanidad en quien la consume. Sin embargo, los sistemas de producción bovina están bajo escrutinio global, con serio riesgo para su existencia futura, donde un estudio global del impacto de la sustitución de la carne de res por otros derivados más amigables con el planeta supuso las siguientes ideas gruesas:

Según Masson D´Croz, “desacelerar el cambio climático es crucial para el bienestar futuro de las sociedades humanas y el medio ambiente en general”. Los sistemas actuales de producción de carne vacuna en Estados Unidos, Australia, Argentina y Colombia son una fuente importante de impactos ambientales negativos y plantean diversas preocupaciones sobre el futuro de la producción de carne a nivel global. Sin embargo, la producción de carne de vacuno proporciona una fuente de alimento rica en proteínas y muchos nutrientes, además de proporcionar empleo e ingresos a millones de personas. La ganadería también contribuye a las identidades individuales y comunitarias y a las culturas alimentarias regionales (el cowboy, el llanero, el pantaneiro, el gaucho, etcétera).

[Inicio de cita]Se han promovido nuevas alternativas a la carne de origen vegetal y las biotecnologías con base en cultivo de tejidos y cultivo de células madre, que al parecer están próximos a salir al mercado, como tecnologías que podrían transformar el sistema alimentario al reducir los efectos negativos de la producción de ganado bovino y el consumo de carne para el medio ambiente, el

bienestar animal y la salud humana (en el caso de que todos esos supuestos sean verdaderos). (Mason-D’Croz et al., 2022, p. 667)

Respecto de los requiebros éticos y morales de la producción y consumo de carne de res, se plantean algunas consideraciones para el análisis (Croney y Swanson, 2023).

Según Croney y Swanson, (2023), “a pesar de la creciente demanda mundial de proteínas, la justificación ética del consumo de carne es cada vez más cuestionada” (p. 62), en especial, porque sobre los sistemas de producción ganadero, a nivel global, pesa la huella hídrica, la huella de carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero derivados de la falta de cuidado en las raciones para rumiantes. Sin embargo, siempre habrá quienes defendemos los sistemas de producción bovina, donde se ocupan de manera cuidadosa del suelo, del agua, de los pastos y de la correcta nutrición de las vacas.

Dicen también Croney y Swanson, (2023), que “Garantizar los derechos humanos a la alimentación requiere deliberación moral” (p. 63). El primer derecho es a la vida. Los países desarrollados no comprarán la carne bovina proveniente de países donde se violan los derechos humanos y donde no se cumplen los acuerdos internacionales para la salvaguarda del ambiente... Aún más grave es una vida con hambre, sabiendo que en los frigoríficos se daña la carne, porque el sistema de distribución no contempla la caridad ni la cooperación, entonces, ¿a esa inmoralidad se refieren? Porque es inmoral, también, derribar la selva húmeda para hacer pastizales, sabiendo que hay tierra ya abierta suficiente para montar ganadería bovina de carne o de leche, ambientalmente justa y económicamente rentable.

El papel de la carne de res para abordar las crecientes necesidades mundiales de alimentos debe considerarse en el contexto de la inocuidad, la calidad, el acceso y la asequibilidad de los alimentos. También deben abordarse los derechos de los animales, el bienestar, el cambio climático y la conservación de los recursos naturales. Croney y Swanson, 2023, p. 65

Todo ese contenido que se reclama como parte de la compensación es parte del pensum de los cursos de sistemas de producción bovina, que se imparten.

Aunque la escasez de recursos naturales puede limitar o eliminar la producción de carne en el futuro, el potencial de la innovación tec-

nológica y los enfoques agroecológicos para compensar los daños animales, ambientales y socio éticos ofrece una justificación para mantener cierto grado de producción y consumo de carne en la actualidad. Croney y Swanson, 2023, p. 66.

Y, como todo lo generado por la agroecología, solo será para unas élites pudientes que sí podrán pagar el precio en dólares por cada kilo de carne o litro de leche ecológica. Eso sí es inmoral.

A quienes han estado durante treinta años viviendo de los bovinos y de los bienes materiales que generan, nunca se les pasó por la cabeza estar dentro de una coyuntura tan apremiante. Es el momento de un cambio tecnológico que podría dejar sin trabajo y sin pan a miles de personas a nivel global, aun en los países desarrollados. Es un momento inesperado. Las conclusiones del estudio de Croney y Swanson (2023) son más que contundentes:

Está abierto al debate si el consumo de carne debería continuar en el futuro y en qué medida. Croney y Swanson, 2023. p. 66.

Los estudios sobre las percepciones de los consumidores realizados en países desarrollados sugieren que en el futuro la gente seguirá comiendo carne, aunque es probable que la frecuencia y la cantidad de carne consumida disminuyan dependiendo de la demografía (el precio como en Colombia), el conocimiento y los valores individuales relacionados con los animales, el medio ambiente y la vida, salud humana y animal. Croney y Swanson, 2023. P 64.

A quienes han estado durante treinta años viviendo de los bovinos y de los bienes materiales que generan, nunca se les pasó por la cabeza estar dentro de una coyuntura tan apremiante. Es el momento de un cambio tecnológico que podría dejar sin trabajo y sin pan a miles de personas a nivel global, aun en los países desarrollados.

Sin embargo, persiste el debate sobre si el consumo de carne es éticamente defendible, aunque la información científica disponible es equívoca en algunas áreas, como se señaló anteriormente, la producción de carne implica daños a los animales y tiene implicaciones significativas para la salud humana¹ y ambiental. Sin embargo, también es perjudicial abandonar por completo el consumo de carne en este momento, no solo para la salud humana, sino también para la equidad alimentaria, la justicia y la viabilidad económica de diversas partes interesadas, incluidas muchas de las más vulnerables de la sociedad. Una dieta exclusivamente basada en plantas no es factible para todos, dadas las limitaciones de la tierra cultivable; y, por otro lado, los costos económicos y ambientales de importar alimentos a esas regiones introducirían o exacerbarían problemas de seguridad y acceso a los alimentos. Además, las dietas basadas en plantas contribuyen claramente a dañar a un gran número de animales de campo cuyas vidas e intereses importan tanto como los animales criados con fines agrícolas. Si la persona promedio tiene o no una conexión personal con los animales de campo y la inversión relacionada en su protección es irrelevante, si de hecho los derechos y el bienestar de los animales se consideran lo suficientemente importantes como para ser tenidos en cuenta en la evaluación ética de nuestras elecciones dietéticas, argumentar lo contrario es lógica y moralmente inconsistente. Sin embargo, despriorizar hoy los derechos humanos a la alimentación (especialmente considerando la urgencia de satisfacer las necesidades globales de proteínas) en favor de los derechos de los animales y la protección ambiental actual y futura no es defendible ni necesario. En lugar de ello, deberían explorarse alternativas que protejan mejor a los animales, las personas y el medio ambiente de daños previsibles y evitables.

Los miembros de la industria cárnica y las partes interesadas deberían abordar deliberada y reflexivamente los argumentos en contra del consumo de carne. Esto debe hacerse no solo con retórica (aunque la comunicación efectiva con el público siempre debe ser una prioridad). En cambio, lo que debería ocurrir es un esfuerzo colaborativo más concertado y una inversión en los avances científicos necesarios para abordar los problemas éticos pendientes asociados con la producción y el consumo de carne, como el bienestar animal. La innovación en la producción alternativa, como la carne cultivada y las alternativas a la carne, son pasos imperfectos pero

1 Estamos siguiendo una nota textual, pero no podemos aceptar todo, porque la carne de bovinos le hace daño a los que la pueden comer en exceso (un estadounidense o un alemán se come su propio peso vivo en carne el año), y en los países como Colombia, el consumo por cabeza escasamente llega a los 20 kilos al año. Lo que hace falta es carne de res de buena calidad para paliar la carencia nutricional prevalente.

importantes para satisfacer las expectativas sociales cambiantes en los países más ricos. Además, depende de medidas estatales, como estrategias de políticas que abarcan la producción, la comercialización, el procesamiento, la distribución, el acceso, el consumo y los sistemas alimentarios en general que podrían evaluarse en el contexto de la ciencia y la práctica más actuales. Si bien es probable que algunas de sus recomendaciones sean polémicas, se podrían incorporar requisitos razonables para una mayor supervisión en áreas como la administración de antimicrobianos, la conservación de los recursos naturales y la protección de los trabajadores agrícolas para reducir los daños asociados con el consumo de carne. Las sugerencias colectivas permitirían mantener el consumo de carne con modificaciones (por ejemplo, la cantidad de carne consumida y los atributos y tipo de producción). Esta opción, si bien es imperfecta y viola notablemente los derechos de los animales, beneficia al grupo más amplio de partes interesadas, considera debidamente sus intereses y valores de proteger a otros (incluidos los animales y el medio ambiente) de un conjunto más diverso de daños, promover sistemas alimentarios más justos y sostenibles y reducir las desigualdades en el acceso y la seguridad de los alimentos. En estas condiciones específicas, parte del consumo de carne podría justificarse moralmente e incluso considerarse éticamente preferible, ya que no solo ofrece una opción práctica, sino que también reduce potencialmente algunas formas de daño. Este es particularmente el caso si los daños considerados incluyen la inequidad de permitir que aquellos que son ricos, empoderados y con seguridad alimentaria limiten las opciones dietéticas disponibles para aquellos que están social, política y económicamente desempoderados.

En el futuro, se debe estar abiertos a discutir qué significa la disponibilidad y seguridad alimentaria en el contexto global, cómo el cambio climático afectará nuestros recursos naturales y la dinámica alimentaria, y dónde se trazan los límites éticos con respecto a lo que comemos y la multitud de factores que afectan nuestras elecciones y las de los demás. Se debe evitar la “vergüenza alimentaria” en cualquier forma en los debates sobre lo que comemos, dadas las limitaciones en materia de seguridad, calidad, acceso y asequibilidad de los alimentos que enfrentan muchos que a menudo son sujetos y rara vez agentes de los debates públicos y la toma de decisiones. Con ese fin, también se debe estar abiertos a discutir las limitaciones actuales y futuras de los recursos naturales y buscar de manera proactiva soluciones que sean científicamente sólidas y éticamente respaldadas. Esto incluye participar activamente o descubrir nuevos métodos para producir alimentos de alta calidad, incluida la carne, y no solo alimentos que se perciben como “autoritarios morales”. Finalmente, debemos estar preparados de manera proactiva para enfrentar la posibilidad de que la escasez de recursos naturales que sustentan la vida, como el agua,

PROCESOS APLICADOS EN LA INDUSTRIA LÁCTEA

ANDREA VÁSQUEZ GARCÍA

INTRODUCCIÓN

pueda obligarnos a tomar decisiones, tanto sociales como políticas, que puedan causar una reducción o eliminación gradual del uso de animales para producir algunos alimentos, incluida la carne y cultivos intensivos en agua.

Este capítulo examina en detalle los procesos utilizados en la producción de derivados lácteos, con un enfoque particular en la composición y propiedades de la leche. Se inicia con una descripción de la leche de vaca, destacando su papel como ingrediente esencial en productos lácteos tradicionales y modernos. Se profundiza en la estructura compleja de la leche y en sus componentes principales, como las caseínas y las proteínas del suero, así como en sus propiedades físicas y químicas. Además, se analizan productos lácteos tradicionales como la leche pasteurizada, leche UHT, crema de leche, mantequilla, yogur, kumis y queso, abordando sus procesos de producción y características distintivas. El capítulo también explora el desarrollo de nuevos productos, como opciones para consumidores intolerantes a la lactosa, productos con probióticos y alimentos especializados para niños y lactantes. Finalmente, se discuten nuevas tecnologías aplicables al procesamiento de la leche, incluyendo innovaciones en

equipos, modificaciones en el procesamiento, certificaciones de origen, producción orgánica, robótica, empaque innovador, y el uso de tecnología 5.0, todo con el objetivo de crear productos diferenciados y de alto valor agregado, alineados con las necesidades del mercado actual.

La importancia de los procesos aplicados en la industria láctea radica en varios aspectos clave como: calidad y seguridad alimentaria, conservación de nutrientes, innovación y diversificación de productos, optimización de la producción, sostenibilidad, y respuesta a las tendencias del mercado. En conjunto, estos procesos son esenciales para asegurar que la industria láctea continúe siendo una fuente confiable de alimentos nutritivos, innovadores y accesibles para una población en constante crecimiento. Con el contenido propuesto en este capítulo, se pretende dar una visión integral y detallada de cómo estos procesos contribuyen al desarrollo y perfeccionamiento de productos lácteos, ofreciendo soluciones que satisfacen tanto las demandas actuales como las futuras, al tiempo que se promueve la innovación y se responde a los retos emergentes en la industria.

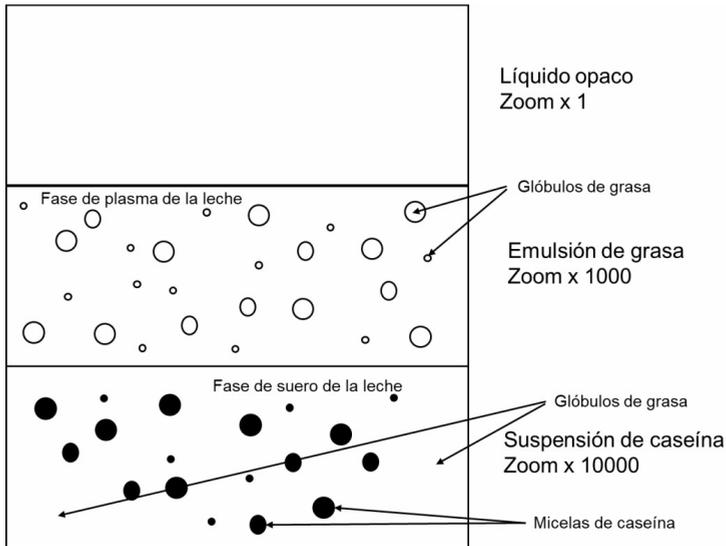
4.1. COMPOSICIÓN DE LA LECHE

Las leches de varias especies de mamíferos difieren en la cantidad, valor nutricional y calidad para la industria de alimentos (Saxelin et al., 2003). Este capítulo se centra en la leche de vaca y en aquellos productos en los que la leche de vaca constituye un ingrediente destacado, mencionando tanto a los productos tradicionales como las nuevas tendencias. El principal componente de la leche de vaca es el agua (cerca del 87 %), seguido por 4,8 % de lactosa, 3,7 % de grasas, 3,2 % de proteínas, 0,19 % de nitrógeno no proteico y 0,7 % de cenizas (Cerón y Correa, 2005). Las principales familias de proteínas de la leche son las caseínas (α S1-caseína, α S2-caseína, β -caseína y κ -caseína) (Calvache y Navas, 2012), las proteínas del suero que constituyen el 20 % de la fracción de proteína (β -lactoglobulina (β -LG), α -lactoalbúmina (α -LA), inmunoglobulinas (IgG), glicomacropéptidos (GMP), albúmina sérica bovina (BSA) y proteínas menores, como: lactoperoxidasa, lisozima y lactoferrina y las inmunoglobulinas (Padilla Doval y Zambrano Arteaga, 2021). Alrededor del 80 % de las proteínas de la leche son caseínas (Cimmino et al., 2023).

En cuanto a la estructura de la leche, es considerada compleja y heterogénea, como se puede observar en la figura 4.1. En este líquido se encuentran más de cien sustancias en un sistema coloidal de tres fases: estado de solución, suspensión y emulsión. Como solución verdadera en el suero se encuentran la lactosa (azúcar de la leche), vitaminas hidrosolubles y diferentes sales minerales (Anand et al., 2013).

Como suspensión se encuentra la proteína caseína dispersa como un gran número de partículas sólidas, tan pequeñas que no sedimentan y permanecen en suspensión (micelas de caseína), las proteínas del suero y el fosfato de calcio (Corredig et al., 2019). Finalmente, como emulsión, se encuentran los glóbulos de grasa, vitaminas solubles y otros lípidos.

Figura 4.1. Estructura de la leche



Fuente: elaboración propia.

La principal función de la leche es nutrir a los consumidores, gracias a su excelente composición nutricional, ser una fuente importante de energía, proteínas de alta calidad y grasas, además de contribuir a la salud metabólica, regulando los procesos de obtención de energía, en especial el metabolismo de la glucosa y la insulina (Park y Haenlein, 2013).

4.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

La leche en su aspecto físico es un líquido que presenta un sabor ligeramente dulce; es de color opaco. Sin embargo, en un determinado volumen parece blanca, aspecto que se debe a la dispersión de la luz producida por las micelas de fosfocaseinato de calcio (Estrada Martínez, 2011). La leche contiene dos pigmentos principales: el primero conocido como caroteno, colorante amarillo que proviene de la fracción lipídica, por lo cual la leche entera rica en crema presenta esa coloración (Stephenson et al., 2021). En cuanto a la leche descremada, presenta un color blanco-azulado

por carecer de caroteno. El segundo pigmento, la riboflavina (vitamina B12), genera un color amarillo-verdoso fluorescente que se encuentra en el suero de la leche.

Algunas propiedades físicas de la leche, como su densidad, viscosidad y tensión superficial, dependen de sus componentes; otras, como el índice de refracción y el punto crioscópico, dependen de las sustancias en solución. Finalmente, otras propiedades, como el pH y la conductividad eléctrica, dependen únicamente de los iones o de los electrones, como es el caso del potencial de óxido-reducción. Los valores medios de estas propiedades pueden ser visualizados en la tabla 4.1. A continuación, se describen brevemente las propiedades más importantes de la leche.

Densidad: es un parámetro que no tiene un valor constante en el caso de la leche, sino que varía con la temperatura y depende de dos factores: concentración de elementos disueltos y en suspensión (la densidad de la leche aumenta cuando el contenido de sólidos aumenta) y de la cantidad de grasa (la densidad de la leche disminuye cuando el contenido de grasa aumenta) (Mahony y Fox, 2014).

Tensión superficial: la presencia de sustancias orgánicas en la leche explica la disminución de su tensión superficial con relación a la del agua. Es importante tener en cuenta que la tensión superficial disminuye al aumentar la temperatura (McCarthy y Singh, 2009).

Viscosidad: la leche es mucho más viscosa que el agua, debido a los glóbulos de grasa y a las macromoléculas. De esta forma, cualquier modificación en el porcentaje de grasa o de proteínas en la leche se refleja en un cambio en la viscosidad. Esta propiedad disminuye con el aumento de la temperatura; además, aumenta cuando el pH de la leche disminuye debajo de 6,0. La viscosidad depende también de la presión: la leche normal es un líquido newtoniano por lo cual la velocidad de flujo es proporcional a la presión (Corredig et al., 2019).

Índice de refracción: el aumento del índice de refracción en la leche es la suma de los aumentos dados por cada constituyente. La contribución de las sales es despreciable y la grasa que se encuentra fuera de la fase continua no interviene, por lo que se prepara un suero para medir este índice (Estrada Martínez, 2011).

Punto de congelación: la leche congela a menos de 0 °C, ya que las sustancias disueltas disminuyen el punto de congelación del solvente. El punto de congelación de la leche es la propiedad menos variable y es una de las medidas más constantes de la leche (Fox et al., 2015).

Conductividad eléctrica: se da en la leche por la presencia de electrolitos, principalmente cloruros, fosfatos, citratos y luego por iones coloidales, este parámetro disminuye la resistencia al paso de corriente. La adición de agua disminuye la conductividad mientras que la acidificación de la leche la aumenta (Ashoorirad et al., 2021).

Acidez y pH: la acidez o cantidad de ácido láctico de la leche se debe principalmente a su contenido de caseína (0,05 - 0,08 %) y de fosfatos. También contribuyen a la acidez el dióxido de carbono (0,01 - 0,02 %), los citratos (0,01 %) y la albúmina (menos de 0,001 %). Su valor a 20 °C se encuentra en promedio entre 0,15 % y 0,16 %.

La acidez se mide con base en una titulación alcalina con hidróxido de sodio 0,1 N, utilizando fenolftaleína como indicador o, en su caso, un potenciómetro para detectar de forma automática el pH. El pH promedio de la leche es de 6,6 a 6,8 a 20 °C, lo que indica que es ligeramente ácida. Las leches pueden tener el mismo pH y por lo tanto la misma estabilidad en los tratamientos industriales y tener el mismo grado de “frescura”, sin embargo, presentar diferente grado de acidez y viceversa (Estrada Martínez, 2011).

Potencial de óxido-reducción (redox): diversos factores intervienen en las propiedades óxido-reductoras de este producto, como el oxígeno disuelto, la xantino-oxidación o la aldehído-reducción; la desnaturalización de las proteínas del suero de leche con la aparición de compuestos sulfurados; el ácido ascórbico, la riboflavina, la cisteína, el pH y probablemente la lactosa y la caseína. La leche fresca tiene un potencial redox positivo entre + 0,20 y + 0,30 V; esta propiedad se emplea para evaluar las cualidades microbiológicas y organolépticas de la leche (Schreyer et al., 2008).

Tabla 4.1. Principales propiedades físicas de la leche

Propiedades físicas	Valores típicos
pH	6,5 - 6,7
Acidez titulable	0,14 - 0,16 %
Densidad	1030 kg m ⁻³
Capacidad calorífica específica	3880 - 4000 Jkg ⁻¹



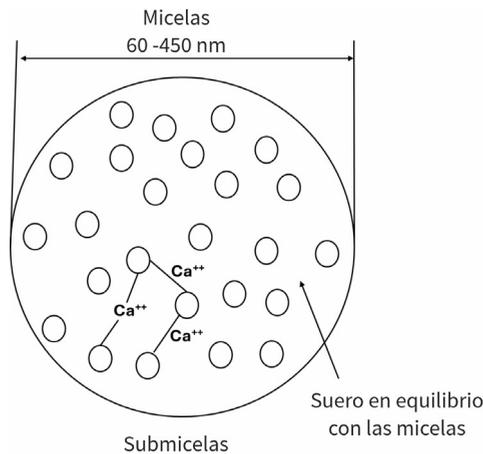
Propiedades físicas	Valores típicos
Conductividad térmica	0,548 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Difusividad térmica	1,34 veces 10 ⁻⁷ m ² .s ⁻¹
Tensión superficial	52 mNm
Conductividad eléctrica	0,460 Sm ⁻¹
Punto de congelación	-0,512 a -0,550 °C

Fuente: elaboración propia.

Fase micelar y lipídica

Las caseínas (α s1-, α s2-, β - y κ -) ocupan el 80 % de la fracción proteica de la leche y son de gran importancia para la tecnología de derivados lácteos (Hassanin et al., 2022). El 20 % restante corresponde a proteínas del suero que difieren en sus propiedades fisiológicas y biológicas. Las caseínas interaccionan entre sí, formando complejos llamados micelas, esa interacción se da gracias a los iones de calcio, y su diámetro suele variar entre 60 y 450 nm, con un promedio de 130 nm (Bauland et al., 2022). En la figura 4.2 se presenta el modelo que permite observar cómo las submicelas se enlazan entre sí, gracias a los iones de calcio.

Figura 4.2. Modelo propuesto de la micela de la leche



Fuente: elaboración propia.



La α -lactoalbúmina y la β -lactoglobulina globulares son las principales proteínas del suero (Chatterton et al., 2006), constituyen el 70-80 % del total de proteínas de suero, siendo el resto inmunoglobulinas, glicomacropéptidos, albúmina sérica, lactoferrina y numerosas enzimas. Las proteínas de la leche son una rica fuente de precursores de péptidos biológicamente activos (Korhonen y Pihlanto, 2006). Los péptidos bioactivos se forman por la hidrólisis enzimática de proteínas o por la actividad proteolítica de las bacterias del ácido láctico en fermentaciones microbianas. Muchos de los péptidos sobreviven a través del tracto intestinal. Los péptidos bioactivos también se forman in vivo por hidrólisis enzimática de las enzimas digestivas (Feijó Corrêa et al., 2023).

La grasa de la leche es un complejo de lípidos y existe en glóbulos microscópicos en una emulsión de aceite en agua en la leche que varían en tamaño entre 0,1 y 22 μm y está compuesta por una variedad de fracciones de lípidos (Early, 2012). La mayoría de los lípidos de la leche son triglicéridos o ésteres de ácidos grasos combinados con glicerol (97-98 %), y la minoría son fosfolípidos (0,2-1 %), esteroides libres (0,2-0,4 %) y trazas de ácidos grasos libres. Aproximadamente el 62 % de la grasa de la leche es saturada, el 30 % monoinsaturada (ácido oleico), el 4 % poliinsaturada y el 4 % de otros ácidos grasos. (Verma et al., 2020).

4.3. PRODUCTOS LÁCTEOS TRADICIONALES

Leche pasteurizada

Es un producto de consumo masivo en el cual la leche se somete a un proceso de aumento de temperatura hasta los 63 °C durante 30 minutos (esta sería la LTLT – *low temperature long time* – baja temperatura alto tiempo), este método es el que conserva mejor el valor nutritivo de la leche, pero su efecto germicida es bajo en leches con alto contenido de microorganismos (Valbuena et al., 2004).

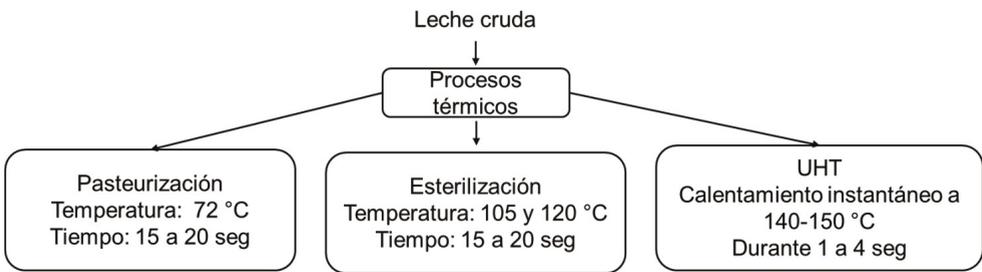
Otro tipo de pasteurización es HTLT (*high temperature long time* – alta temperatura alto tiempo), en el cual se somete la leche durante 15 a 30 segundos a una temperatura de 72 °C, siendo este el método más utilizado y adecuado de pasteurización (eliminando mohos, levaduras y la mayor parte de las formas vegetativas de las bacterias). Posterior a este proceso se baja la temperatura hasta los 6 °C, siendo su periodo máximo de utilización de una semana; esta leche es más conocida como “leche fresca” (Watts, 2016).

Leche ultra alta temperatura (UHT, *Ultra High Temperature*)

Aplicación de temperaturas entre 135 °C y 150 °C durante un segundo (mínimo legal exigido) hasta los cuatro segundos normalmente, posteriormente se baja la temperatura y se envasa en condiciones asépticas. Prácticamente no se producen modificaciones en la composición de la leche, pudiendo notarse no obstante ligeras modificaciones en el sabor (dejando un sabor especial debido a la caramelización de parte de los azúcares de la leche) (Malmgren, 2007). Esta leche tiene una alta fecha de caducidad y es conocida también como “leche de caja”.

Una síntesis de los diferentes procesos térmicos a los que puede ser sometida la leche es relacionada en la figura 4.3.

Figura 4.3. Diagrama de los diferentes tratamientos térmicos de la leche

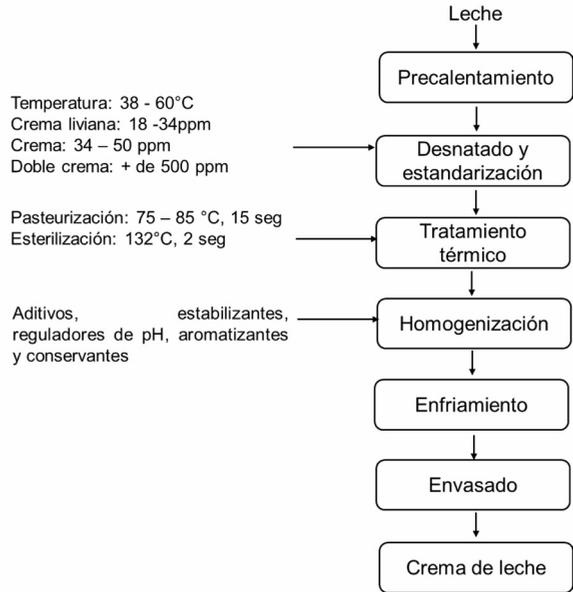


Fuente: elaboración propia.

Crema de leche

Es el producto en el que se ha reunido una fracción determinada de grasa y sólidos no grasos de la leche, por lo cual se considera una emulsión de crema en agua, ya sea por reposo, por centrifugación o por reconstitución, sometida a pasteurización o a cualquier otro tratamiento térmico que asegure su inocuidad, que puede llegar a contener aproximadamente 27 % de sólidos totales, 19 % de grasa, 2,9 % de proteínas, 4 % de lactosa, 0,6 % de cenizas y 3 % de agua, siendo posible encontrar en el comercio cremas con diferentes contenidos composicionales de acuerdo con la NTC 930 de 2008. En la figura 4.4 se puede observar el esquema de elaboración de este producto.

Figura 4.4. Diagrama de elaboración de la crema de leche

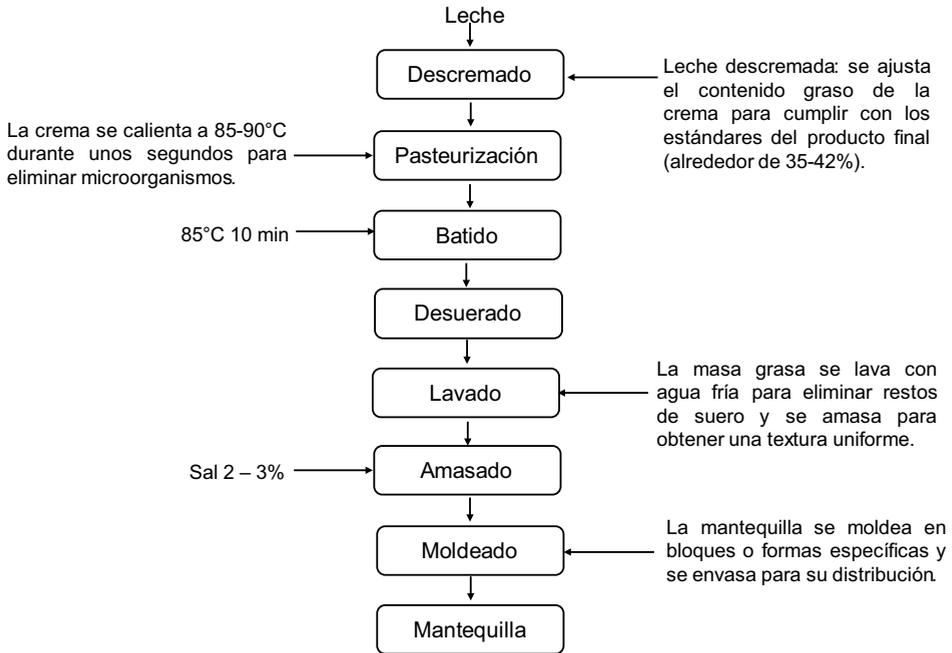


Fuente: elaboración propia.

Mantequilla

Es un producto que se obtiene a partir de la maduración de la crema de leche higienizada y tras la eliminación de gran parte de la fase acuosa, presenta un color de blanco amarillento al amarillento oro (McCarthy, 2011). Por tanto, la mantequilla es una emulsión de agua en crema, que es pasteurizada para inhibir las lipasas; se somete a maduración, fermentación por bacterias como *Lactococcus lactis*, *Streptococcus diacetylactis*, *Streptococcus heterofermentativos* y *Leuconostoc* spp o acidificación, batido o amasado, pudiendo adicionársele o no sal (cloruro de sodio), en cuyo caso no debe superar el 3 % (Cuadros Hernández, 2015). Es un producto con un contenido de grasa de 80 % o más y sólidos no grasos cerca del 2 %. El producto puede presentarse a temperatura ambiente en estado sólido o semisólido. El procedimiento se basa en las disposiciones del NTC 734 de 1996 “Productos lácteos: Mantequilla”, en la figura 4.5 se puede observar.

Figura 4.5. Diagrama de elaboración de la mantequilla



Fuente: elaboración propia.

Yogur

Es un producto lácteo fermentado que se obtiene por la multiplicación de bacterias ácido lácticas (BAL). Todos los yogures tienen esto en común: que la leche está fermentada con *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus* viables que crecen en sinergia en la leche (Yeboah et al., 2023). En el proceso de fermentación se puede usar leche pasteurizada entera, parcialmente descremada o descremada y se lleva a cabo a 30-43 °C durante 2,5-20 horas, como se puede observar en la figura 4.6. Las BAL se alimentan de la lactosa (azúcar de la leche) y la transforman en ácido láctico (Sfakianakis y Tzia, 2014). El incremento de la acidez produce la modificación de las proteínas, lo que genera la coagulación y cambio en la textura. Existe una gran variabilidad de tipos de yogur en función de su consistencia (coagulados, líquidos, *mousse*), composición (desnatados, semidesnatados, normales, enriquecidos), sabor (natural, con azúcar, miel, con sabores, con fruta, etcétera), o adicionados (colorantes y estabilizadores permitidos), es regulado por la NTC 805 de 2005.

Figura 4.6. Diagrama de elaboración de yogur



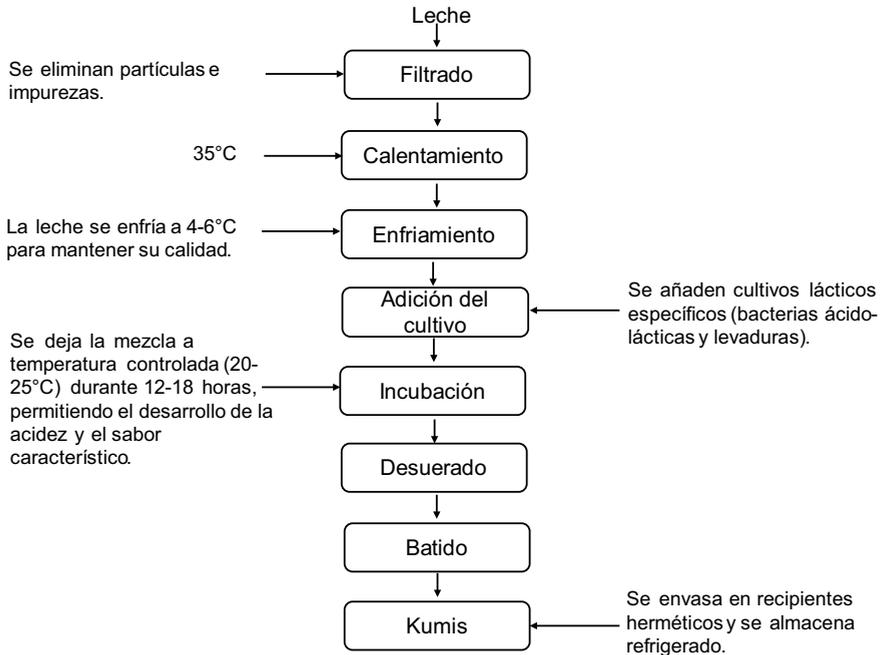
Fuente: elaboración propia.

Kumis

Lo definen como una bebida tradicional y una de las más consumidas en Colombia, se considera un probiótico (Chaves-López et al., 2011), y proporciona vitaminas, proteínas y minerales en cantidades considerables, contiene microorganismos capaces de multiplicarse y mantenerse en el interior del intestino, donde contribuyen con la flora local a eliminar toxinas y a digerir los alimentos, además de que mejoran la absorción de nutrientes y reducen en forma importante el riesgo de generar enfermedades en el colon, incluso cáncer (Chiliquinga Yugcha, 2017), es regulado por la NTC 805 de 2005 para leches fermentadas - kumis. El esquema de elaboración de este producto se muestra en la figura 4.7.

El incremento de la acidez produce la modificación de las proteínas, lo que genera la coagulación y cambio en la textura. Existe una gran variabilidad de tipos de yogur en función de su consistencia (coagulados, líquidos, mousse), composición (desnatados, semidesnatados, normales, enriquecidos), sabor (natural, con azúcar, miel, con sabores, con fruta, etcétera), o adicionados (colorantes y estabilizadores permitidos), es regulado por la NTC 805 de 2005.

Figura 4.7. Diagrama de producción del kumis



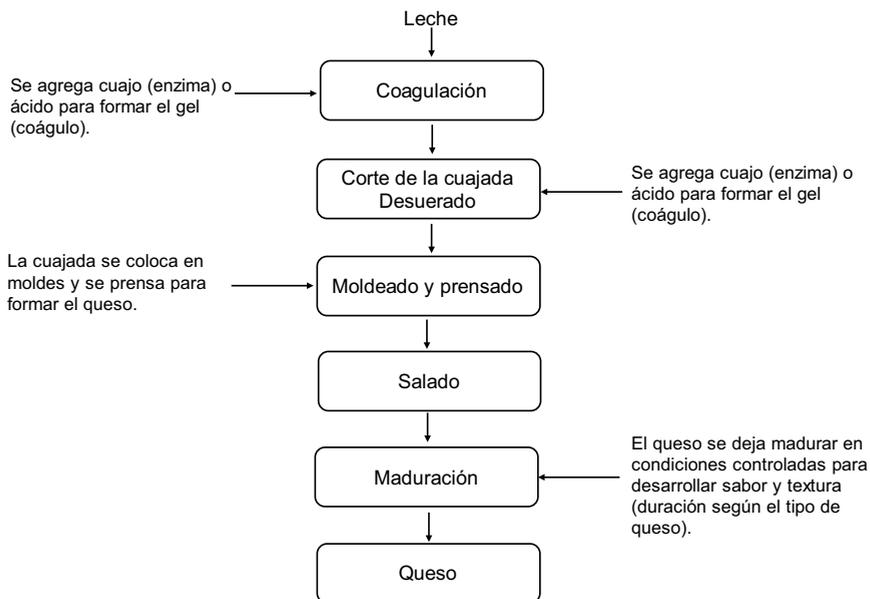
Fuente: elaboración propia.

Queso

Es un producto que se elabora con leche entera, crema, leche descremada o con mezclas de estos productos. De forma general, el queso se produce por coagulación de las proteínas de la leche, a partir de fermentos lácteos o cuajo (renina) o pepsinas extraídas del estómago de bovinos y porcinos, seguida del desuerado del coágulo obtenido (Czyżak-Runowska et al., 2020). Este proceso se puede favorecer añadiendo enzimas apropiadas (de *Bacillus cereus*, *Endothia parasitica*, *Mucor miehei*, *Mucor pusillus*; quimosina derivada de *Escherichia coli* K12 y *Kluyveromices marxianus* subesp. *lactis*), acidificando o calentando (Romero del Castillo Shelly y Mestres Lagarriga, 2004). A continuación, se moldea, se sala, se prensa y, en algunos tipos de queso, se siembra con cultivos fúngicos o bacterianos (Zhao, 2011). En algunos casos también se le añaden colorantes, especias u otros alimentos no lácteos. Se consume en fresco o con distintos grados de maduración, las principales etapas de elaboración de este producto se relacionan en la figura 6. Se conocen más de 2000 tipos de quesos diferentes en todo el mundo, presentan características muy distintas y que requieren para su elaboración una serie de procedimientos más o menos diferenciados (Ong et al., 2017). La fabricación del queso se hace con

la leche, bien sea descremada, semidescremada o entera que ya ha sido tratada térmicamente y homogenizada (Singh y Waungana, 2001). Una vez lista, antes del proceso de coagulación se adecua la temperatura y se añaden los fermentos o enzimas encargados de la formación del gel o coágulo, este gel está constituido de una parte de la proteína de la leche, la caseína, que retiene la materia grasa y una parte más o menos grande de la fase acuosa de la leche, llamada lactosuero (Sbodio y Revelli, 2012). Terminada la coagulación se corta la cuajada en pequeños cubos para favorecer la separación del suero; después de separar el suero, la cuajada se pasa a los moldes y, en algunos casos, se prensa (González et al., 2016). Una vez estabilizada la forma del queso, se sala y se procede a la maduración, para adquirir características organolépticas específicas. En algunos quesos el proceso termina con el desuerado y envasado sin que tenga lugar la etapa de maduración (categoría quesos frescos) (Ramírez-López y Vélez-Ruiz, 2012). El esquema de elaboración de este producto se relaciona en la figura 4.8.

Figura 4.8. Diagrama de elaboración del queso



Fuente: elaboración propia.

Kéfir

Salazar et al. (2019) mencionan que el kéfir es una bebida láctea fermentada que se originó en Europa del Este y se ha elaborado durante siglos.

El término se deriva de la palabra kefir, que significa “sabor agradable” en turco. Kéfir también se conoce como Kefyr, Kéfir, Kefer, Kia-phur, Knapon, Kepi o Kippi. Si bien ha sido ampliamente consumido en Rusia y en Asia central, como Kazajistán, Kirguistán durante siglos, ahora es cada vez más popular en Países europeos, Japón y Estados Unidos debido a sus efectos nutricionales y terapéuticos.”.

Esta bebida tradicional se produce mediante un cultivo iniciador que contiene diversas especies de *Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Lactobacillus*, *Acetobacter* y levaduras, que confieren al producto su sabor y aroma especiales (Toulouse, 2004). El kéfir tiene efectos beneficiosos sobre la inmunidad y el sistema digestivo/gastrointestinal, además de su reducción de colesterol, alergia, curación de heridas, prevención de intolerancia a la lactosa, anticancerígeno y antimicrobiano (Ahtesh et al., 2018).

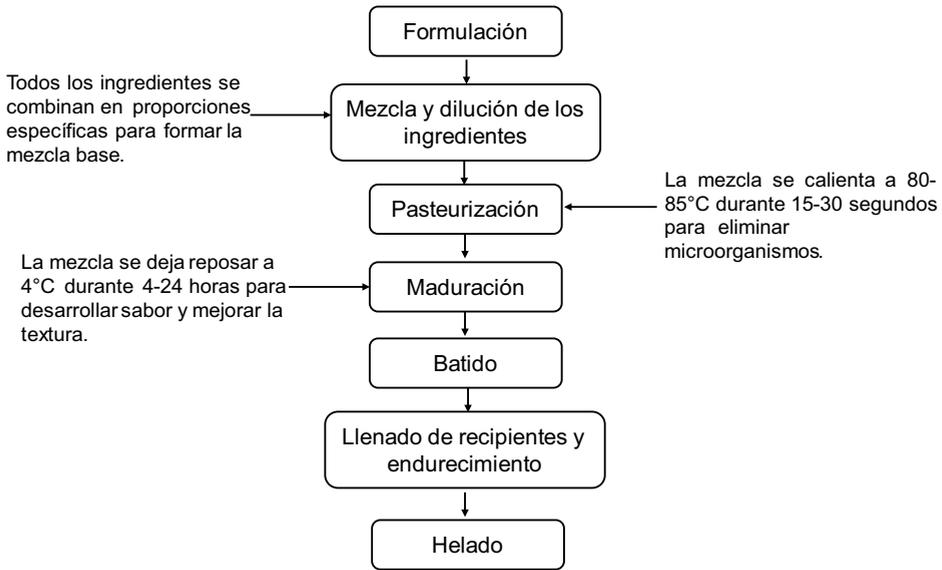
Helado

Es una dispersión coloidal que consiste en una emulsión-espuma congelada que se mantiene homogénea durante su almacenamiento (Pintor y Totosa, 2013). El helado consta de una fase dispersa (con tres principales constituyentes estructurales: burbujas de aire, cristales de hielo y glóbulos de grasa emulsionados y dispersados) que se encuentra inmersa en una fase continua (fase líquida de alta viscosidad con azúcares, proteínas de leche e hidrocoloides disueltos en agua no congelada, fase denominada suero) (Pintor et al., 2017). Es elaborado mediante la congelación con agitación de una mezcla pasteurizada compuesta por una combinación de ingredientes lácteos que pueden contener grasas vegetales, frutas, huevo, sus derivados y aditivos (Pérez Sánchez et al., 2023). Los helados no deben tener una densidad menor de 475 g/l y deben tener una proporción de grasa, una de sólidos no grasos

Los helados no deben tener una densidad menor de 475 g/l y deben tener una proporción de grasa, una de sólidos no grasos y otra de sólidos totales específicas según la normatividad de cada país (López y Sepúlveda, 2012).

y otra de sólidos totales específicas según la normatividad de cada país (López y Sepúlveda, 2012), en la figura 4.9 se puede observar el esquema de elaboración de este producto.

Figura 4.9. Diagrama de elaboración del helado

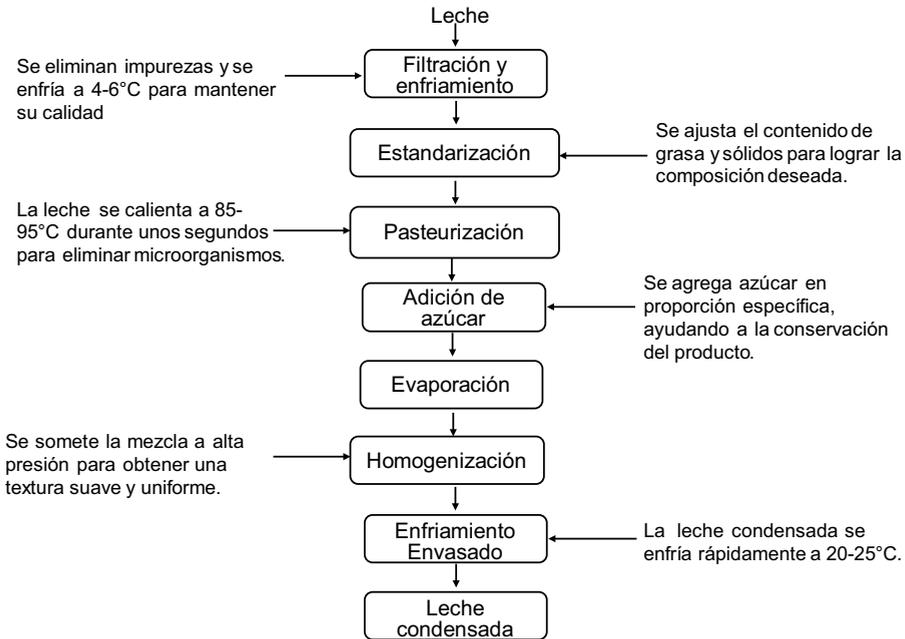


Fuente: elaboración propia.

Leche condensada

Se obtiene mediante la evaporación parcial del agua de la leche, en operaciones conocidas como espesamiento, concentración y condensación (Hess, 2003). Después se le añade azúcar, en una proporción que va desde el 30 %, si la materia prima es leche entera, hasta el 50 %, si es leche descremada (NTC 879). La alta concentración de azúcar debe impedir por sí sola el desarrollo de los gérmenes que queden en la leche después del precalentamiento (Jouki et al., 2021). Este producto es una fuente rica en carbohidratos, proteínas, calcio y vitaminas que puede ser usado en la alimentación humana. Entre sus beneficios encontramos que es un energizante, revitalizante, disminuye la ansiedad. Sin embargo, al ser un producto con una alta concentración de carbohidratos, su uso desmedido puede ocasionar grave alteración en el control de la glicemia en el cuerpo (Renhe et al., 2017). El esquema de elaboración de este producto se relaciona en la figura 4.10.

Figura 4.10. Diagrama de elaboración de la leche condensada

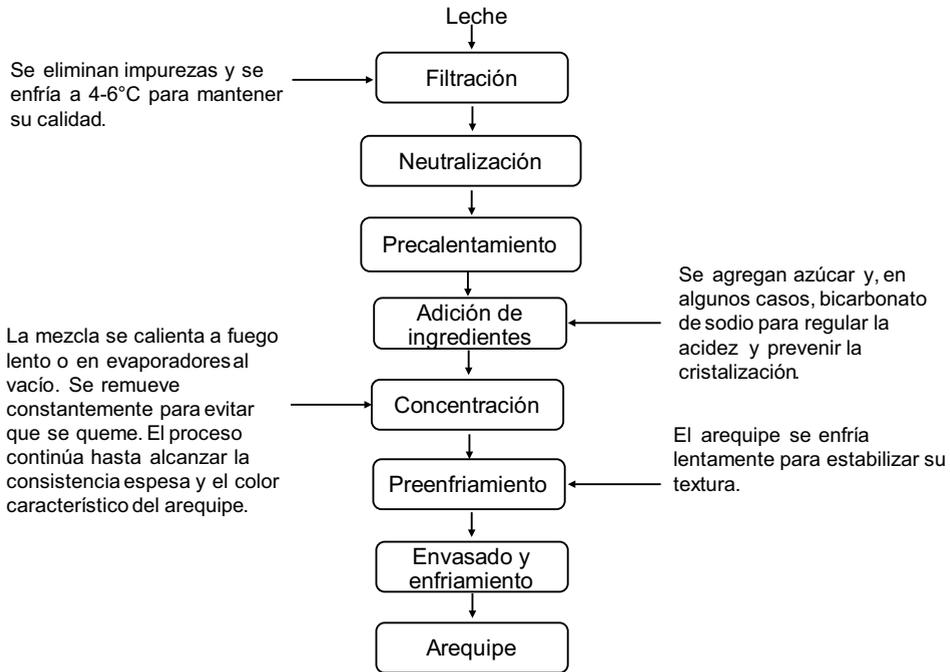


Fuente: elaboración propia.

Arequipe

El arequipe es un dulce tradicional de varios países latinoamericanos, principalmente Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, México, Perú y Uruguay (Román Ramírez, 2021). Es un alimento de textura blanda y pegajosa, elaborado a partir del proceso de concentración térmica de los sólidos propios de la leche, junto con los aportados por el azúcar, principalmente la sacarosa (Olarte Ríos, 2023). En cada uno de los países tiene una denominación diferente, en Chile se conoce como manjar, manjar de leche o manjar blanco; en Argentina y Brasil se denomina dulce de leche; en Centroamérica es conocido como cajeta y en Colombia y Venezuela como arequipe (Penci y Marín, 2016). El esquema de elaboración de este producto se relaciona en la figura 4.11.

Figura 4.11. Diagrama de elaboración del arequipe



Fuente: elaboración propia.

Manjar blanco

Es un producto que se caracteriza por adicionar a la leche almidón de arroz. Sin embargo, se ha evaluado otro tipo de almidones, como el de fríjol y el de almendras. El procedimiento se basa en la NTC 3757 (Novoa y Ramírez-Navas, 2012).

Productos industriales modificados

Actualmente el sector de los lácteos se enfrenta al desafío de generar alimentos innovadores de forma sustentable para una población en crecimiento, manteniendo un nivel de confianza y calidad en toda la cadena de suministro, y a su vez con la posibilidad de generar nuevas oportunidades económicas mediante el desarrollo de productos con alto valor agregado. Es importante resaltar los cambios en los hábitos alimenticios de los consumidores de derivados lácteos, como, por ejemplo: productos con bajo contenido de lactosa, bajos en edulcorantes, incorporación de compuestos bioactivos o compuestos como vitaminas y minerales, incorporación

de probióticos y prebióticos, que refuercen el sistema inmunitario, entre otros. En cuanto a las políticas públicas de Colombia de bioeconomía, se busca aplicar herramientas tecnológicas y biotecnológicas para el aprovechamiento de subproductos generados durante la obtención de los derivados lácteos para diversos usos como: creación de productos innovadores, producción de microorganismos, incorporación en otras matrices alimentarias. A continuación, se presentan innovaciones desde los microorganismos, productos a base de leche en polvo, fermentos lácteos, quesos, desarrollo de nuevos productos, nuevas tecnologías en el procesamiento de alimentos y tecnologías 5.0 aplicadas a la industria de alimentos.

Microorganismos

- Aislamiento de nuevas bacterias ácido lácticas como *Lactococcus lactis* (Goa et al., 2022).
- Productos dietéticos que incluyen microorganismos (principalmente probióticos del género *Lactobacillus* sp y *Bifidobacterium* sp) (Ağagündüz et al., 2021).
- Desarrollo de medios de cultivos para el crecimiento de microorganismos (especialmente para *Lactococcus lactis* y *Lactobacillus casei*) (García Montes et al., 2024).
- Métodos novedosos de elaboración y composiciones (yogures con *Lactobacillus* y *Bifidobacterium*) (Salama y Bhattacharya, 2022).
- Preparaciones lácteas con microorganismos y diversos ingredientes, como endulzantes y edulcorantes bajos en calorías, proteína de suero y extractos de planta (Kiełczewska et al., 2020).
- Obtención de mantequilla con adición de BAL para mejorar sus propiedades organolépticas (Banerjee y Qamar, 2022).
- Nuevas alternativas de cultivo iniciadores en procesos de fermentación (Shori y Al Zahrani, 2022).
- Nuevas cepas bacterianas productoras de ácido fólico pertenecientes al género *Bifidobacterium* (*B. adolescentis*, *B. brevis*, *B. pseudocatenolatum*) (Sharma et al., 2021).

- Cultivos probióticos utilizados para mejorar el sistema inmune (Mazziotta et al., 2023).

Leche en polvo

- Leche en polvo aplicada como estabilizante de bebidas (Song et al., 2023).
- Nuevos métodos de obtención por microfiltración, ultrafiltración de leche y suero, así como por diálisis y ósmosis reversa (Da Cunha et al., 2022).

Fermentos lácteos

- Métodos de obtención de los productos lácteos fermentados en los que se modifican variables como pH (Da Silva Leal et al., 2022).
- Incorporación de coagulantes y enzimas para la disminución de lactosa (Mir Khan y Selamoglu, 2020).
- Lácteos fermentados para cuidar la salud inmunitaria (Illikoud et al., 2022).
- Yogur con ácidos grasos omega-3 y probióticos (Macedo y Ramírez y Vélez-Ruiz, 2015).
- Yogur cuchareable descremado *light + fit* con colágeno, antioxidantes y vitaminas A y E y sin gluten (Dini, 2019).
- Yogur griego con colágeno (Dini, 2019).
- Yogur con kombucha, una bebida milenaria, tendencia en los últimos meses por sus propiedades antioxidantes, mejoramiento del sistema inmune y funcionamiento intestinal (Batista et al., 2022).

Quesos

- Quesos con diversos aditivos (Şahin et al., 2024).
- Métodos de obtención de quesos (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis reversa (Kumar Sachan y Karnwal, 2022).

- Quesos madurados, rellenos y salados con adición de diferentes agentes de coagulación (Soleimani et al., 2024).
- *Snacks* saludables de queso (Chuck-Hernandez et al., 2022).
- Quesos *wellness* de primera calidad, enriquecidos con probióticos, vitamina D y omega-3 (Stratulat et al., 2015).

Desarrollo de nuevos productos

- Formulación nutricional que incluye péptidos de la leche de vaca para inducción de la tolerancia (D'auria et al., 2021).
- Productos lácteos para el control de peso (Zemel, 2005).
- Productos infantiles con probióticos (Lükewille y Uhlig, 2007).
- Fórmulas hipoalérgicas con hidrolizado de proteínas para lactantes hipersensibles a la leche, productos lácteos enriquecidos con Ca, vitaminas, etcétera (Moneret-Vautrin et al., 2001).
- Productos derivados del suero de leche (suero lácteo desproteinizado, suero lácteo modificado, cremas de untar, licores, etcétera) (Mollea et al., 2013).
- Mezcla de polvo que contiene pulpa de fruta deshidratada, fibra prebiótica y cultivos probióticos para preparar bebida láctea enriquecida (Rahman, 2022).
- Bebidas lácteas, productos sin lactosa o bajos en lactosa, con propiedades nutracéuticas y funcionales, vienen ganando terreno en la preferencia del consumidor, son ricas en proteínas, teniendo en cuenta que la proteína está siendo altamente valorada (Singh et al., 2022).
- Fórmulas infantiles de calidad superior (Talbot, 2015).
- Productos libres de lactosa o con incorporación de la enzima lactasa para mejorar el bienestar digestivo (Capcanari et al., 2021).
- Productos lácteos con prebióticos de alta calidad.

- Proteína de leche como suplemento dietario en el mercado deportivo y energético.
- Desarrollo de alimentos funcionales a base de lácteos enriquecidos en ácido linoleico conjugado con especial referencia al ácido ruménico (Hennessy et al., 2007).
- Aislado de proteína de suero de leche, siendo un agua sin azúcar con sabores naturales, pero con la funcionalidad de las proteínas.
- Derivados lácteos *on the go*: lácteos a toda hora y en todo lugar. Se debe a las propiedades de estos, como son: el bajo contenido de grasa, la eliminación de la lactosa y el azúcar y la alta presencia de proteína.
- Leches combinadas con frutas y helados de yogur.
- La leche de búfalo, queso de cabra u otros lácteos y derivados lácteos son apetecidos en otros países. En el mercado nacional se ha visto una tendencia a su consumo; no obstante, se requiere mayor comunicación y educación para que el consumidor los conozca y los incluya en su dieta.
- Leche de origen y de pastoreo, ultrafiltradas y concentradas.
- Productos saludables como lácteos funcionales y productos híbridos, debido al incremento en la demanda de bebidas lácteas de origen vegetal, se convierte en un reto para la industria.

4.4. NUEVAS TECNOLOGÍAS EN EL PROCESAMIENTO DE LECHE

- Máquina y proceso para elaborar alimentos extruidos a base de quesos procesados.
- Sistema de pasteurización de leche y calostro.
- Equipo para la preparación de queso o productos de queso que contienen al menos un compuesto sensible al calor.

- Método para producir automáticamente espuma de leche y aparato para hacer espuma de leche.
- Producción orgánica en la cadena de producción de lácteos (calidad de la leche, bienestar animal, sustentabilidad, no uso de plaguicidas, tratamientos veterinarios nativos o complementarios, prevención y control de enfermedades).
- Sobreenfriamiento, transporte internacional de productos frescos, teniendo en cuenta que los mercados solicitan productos refrigerados, de sabor fresco y naturales, en lugar de productos congelados y con conservantes.
- Innovaciones ambientales: envases sostenibles (elaborados a partir de otros materiales que no son plásticos), etiquetas removibles (se separa del envase sin dejar residuos en el empaque, facilitando los procesos de reciclaje), eliminando el solo uso (llenado de sus recipientes o bien el uso de materiales como el acero), sin envase (el uso de máquinas expendedoras que permitan a los consumidores utilizar sus propios recipientes es cada vez más frecuente), bioempaques (lactosuero como materia prima para la elaboración de empaques sostenibles).
- Nuevas tecnologías y equipos de última generación que optimicen el consumo energético en las etapas de procesamiento, envasado y almacenamiento, conscientes de la importancia de reducir la huella de carbono, la eficiencia energética se ha convertido en una prioridad para las empresas del sector lácteo.
- Certificaciones de origen, producto orgánico, alimentación ética y responsable de las vacas y el respeto por el medio ambiente serán una prioridad para el consumidor.
- Etiqueta y sabores limpios son cada vez más valoradas en el mercado lácteo, con desarrollo tecnológico en el sector de ingredientes que se centra en mejorar la textura y la experiencia de sabor.
- Sistemas de información en tiempo real. Con estos datos, los ingenieros de alimentos pueden monitorear y ajustar las condiciones de producción al instante, mejorando así la eficiencia energética y reduciendo los costos operativos.

- Integración y conversión de datos: es importante verificar cómo se interpretan los datos que vienen de distintas corrientes de la cadena, como la producción en el sector primario, las operaciones unitarias de la manufactura, la logística y el consumidor. El foco aquí es la integración y la interpretación de las distintas formas en que se presentan los datos, con el fin de priorizar la comunicación y la transferencia de datos.
- *Track & Trace*: es la tecnología que desarrolla la lectura y el registro automático de productos en movimiento de forma simultánea, es decir capturar en qué parte de la cadena de valor se encuentra el producto. Por ejemplo, los códigos QR y el sistema *distributed ledger technology* (DLT), que permiten ver la trazabilidad de la leche de origen hasta su consumo.
- Robótica ayuda a reducir el desperdicio de alimentos, al tiempo que mejora la seguridad de los trabajadores.
- Capacidad de acceder a una conexión *wi fi* y a internet, para conectar mediante plataformas digitales a lo largo de toda la cadena láctea.
- Transformación de datos mediante test analíticos, mediante el uso de la espectroscopía infrarrojo MID y NIR para el análisis de nutrientes (proteínas, grasa, lactosa, etcétera). Mediante estas metodologías se puede analizar la composición de la leche y correlacionarla con la funcionalidad y salud animal. También hay algunos modelos predictivos basados en MIR para el procesamiento de la leche.
- Identificación del microbioma: sirve para fomentar la seguridad alimentaria y la trazabilidad de los productos lácteos. Tecnologías como *next-generation sequencing* (NGS) son rápidas y es una herramienta efectiva para identificar precisamente los microorganismos presentes en toda la cadena láctea y los cambios que se dan en la población microbiana de la materia prima hasta llegar al producto final.

Tecnologías 5.0 en la industria láctea

- Lácteos derivados de la fermentación de precisión son una importante alternativa nutricional con similares sabores y texturas de los productos convencionales, sin descuidar el impacto climático y los desafíos de costos que tienen los lácteos.

- Optimización de los procesos de producción de queso mediante la mejora en la toma de decisiones para mejorar la consistencia, la calidad y el rendimiento del producto en menor tiempo.
- Inteligencia artificial para adquirir los productos y recibir información actualizada sobre el bienestar animal. También para automatizar tareas, mejorar el control de calidad, reducir el desperdicio de alimentos y predecir la demanda.
- Biotecnología: empleo de biosensores para recopilar datos sobre los procesos de fabricación, lo que permite mejorar la eficiencia y calidad. Además de incluir la inteligencia artificial, también se puede emplear la biotecnología para la generación de nuevas cepas de microorganismos que generen en su desarrollo una mayor cantidad de compuestos bioactivos, crezcan de una forma más rápida y en diferentes sustratos. Otra aplicación de la biotecnología en la industria de alimentos es el desarrollo de fermentadores especializados para cada uno de los productos que pretenden ser elaborados, con control de temperatura, aireación, agitación, entre otras variables.
- *Blockchain* es una tecnología que permite realizar diagnósticos avanzados en seguridad alimentaria y genómica animal. En el ámbito alimentario, facilita la trazabilidad y transparencia en la cadena de suministro, permitiendo verificar el origen y las condiciones de los productos desde su producción hasta el consumidor final. En cuanto a la genómica animal, el perfil genético de una vaca lechera puede asociarse con diversos factores, como su alimentación, historial médico, ambiente de crianza y calidad de la leche que produce. Esta información se integra en un registro digital inmutable, mejorando la gestión sanitaria y la calidad del producto final.

Por lo relacionado anteriormente, se puede visualizar que el futuro para los derivados lácteos es prometedor con un amplio portafolio de productos y tecnologías para desarrollar productos novedosos de alto valor agregado, que revolucionarán ese sector y permitirán la incursión de nuevas industrias y empresas, acorde con las nuevas necesidades y exigencias de los consumidores.

ACEITES Y GRASAS ALIMENTARIAS

**GINNA ALEJANDRA ORDÓÑEZ
NARVÁEZ**

INTRODUCCIÓN

Los aceites y grasas conforman un grupo de compuestos de interés nutricional que, junto con proteínas y carbohidratos, hacen parte de la estructura de las células vegetales y animales. Por su naturaleza química, estos compuestos no son solubles en agua, sino en algunos solventes orgánicos, lo cual determina sus propiedades de extracción, procesamiento y utilización para la industria alimentaria (Albisu Aguado y Fernández Gil, 2008).

Cerca del 71 % de los aceites y grasas derivan de fuentes vegetales, de ahí la importancia de las semillas oleaginosas como materia prima alimentaria (Valdés et al., 2013). Como elementos nutricionales, los aceites y las grasas son una fuente de energía que se componen esencialmente para el desarrollo de las funciones fisiológicas (Ordóñez et al., 2014), tales como la absorción de vitaminas liposolubles, el transporte de hormonas y la conformación de la estructura celular (Albisu Aguado y Fernández Gil, 2008).

La distinción física entre una grasa y un aceite se basa en el estado de su estructura a temperatura ambiente; una grasa generalmente se comporta

como un sólido, mientras que un aceite se comporta como líquido, en cuanto a sus características químicas no es estándar, corresponde al aporte de ácidos grasos saturados, monoinsaturados y poliinsaturados que varía según la fuente de origen, sea animal o vegetal, y de esta última, según la especie y el órgano donde se origina; semilla, planta o fruto cada uno con su particularidad funcional (Agro-Processing and Food Engineering, 2022). Algunas semillas no convencionales, como las de zapallo, se destacan por su alto contenido de ácidos grasos insaturados, alrededor de un 80 %, destacándose el ácido oleico y linoleico (Valdés et al., 2017).

5.1. ESTRUCTURA FISICOQUÍMICA

Los aceites y las grasas presentan como estructura básica los ácidos grasos (AG). Estos son un conjunto de moléculas que presentan diferentes características estructurales conformados por un grupo carboxilo (-COOH) en un extremo y un grupo metilo (-CH3) en el otro, la cadena hidrocarbonada identifica al ácido en particular, lo que hace que sea muy variable, de allí que su denominación puede surgir del hidrocarburo de igual número de átomos de carbono, como se presenta en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Denominación de un ácido graso con el mismo nombre de los hidrocarburos de igual número de átomos de carbono, sustituyendo la terminación oico e ico

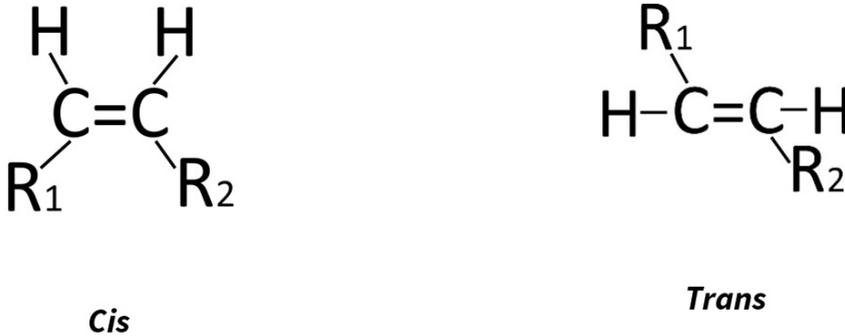
Hidrocarburo	Ácido graso
$CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2CH_3$ Hexano	$CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2 - COOH$ Hexanoico
$CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2 - H$ Pentano	$CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2 - COOH$ Pentano 1- carboxílico

Fuente: elaboración propia.

Esta cadena de carbono puede presentar enlaces simples o enlaces dobles, tener número par de carbonos y tener una configuración geométrica tipo *cis* y *trans* (figura 5.1) que indican que sus grupos alquilo están o no, al otro lado de la molécula.



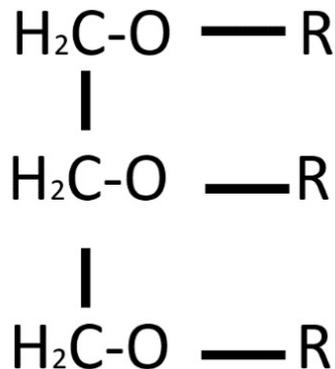
Figura 5.1. Configuración cis y trans de los dobles enlaces del grupo carboxilos y los extremos metilos



Fuente: elaboración propia.

Los ácidos grasos se encuentran en los alimentos generalmente esterificados, integrando los triglicéridos, muy baja proporción de forma libre. Los triglicéridos (TGA) son moléculas de glicerol unidas a tres ácidos grasos (figura 5.2). Los aceites y las grasas naturalmente se componen de una mezcla compleja de triglicéridos individuales, estas conformaciones pueden ser homotriglicéridos, donde los tres ácidos agrupados son iguales, o pueden ser quirales, donde la primera y tercera cadena de ácidos son diferentes (Fennema et al., 2019).

Figura 5.2. Estructura simple de la conformación de un homotriglicérido. La molécula de glicerol tiene tres grupos hidroxilo (HO-) y R corresponde al ácido graso unido a través de un enlace tipo éster



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la estructura química de los ácidos grasos, son de interés en la industria alimentaria, principalmente los lípidos simples, los cuales están conformados por triglicéridos de ácidos grasos saturados o insaturados que provienen de las grasas animales, como el huevo, el sebo, la manteca de cerdo y la grasa de la leche, también de los aceites extraídos de la pesca. Así mismo se obtienen de las grasas vegetales, extraídas de las semillas de girasol, soya y algodón, los frutos secos como las almendras y el olivo, y de otras pulpas de frutos como el aguacate y el coco.

5.2. NOMENCLATURA Y CLASIFICACIÓN

La nomenclatura de los ácidos grasos puede variar de acuerdo con el sistema de identificación: nombre común, nombre sistemático o científico, notación simplificada o notación ω . El nombre químico debe describir claramente la estructura química, por lo tanto, se sigue una nomenclatura sistemática o científica recomendada por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC-IUB Comisión sobre la Nomenclatura, 1978). A continuación, se describen las denominaciones existentes para los ácidos grasos.

- **Nombre común:** con este se conoce habitualmente el ácido graso de manera simple (oleico, palmítico, esteárico), no todos tienen esta nominación.
- **Nombre sistemático o científico (IUPAC):** ácido + nombre común + sufijo *oico*. Ya que el ácido graso puede ser saturado o insaturado, se denomina de acuerdo con su estructura; así entonces, el sufijo para un ácido graso saturado es *anoico* (hexanoico). Si el ácido graso es insaturado, el nombre, además, tiene en cuenta el número de enlaces (mono, di, tri) + *enoico*, se le coloca la posición de los dobles enlaces y se indica si su isomería geométrica es *cis* o *trans* (ácido *cis*-9, *cis*-12- octadecadienoico).
- **Notación simplificada y notación ω :** en la notación simple se indica el número de carbonos, dobles enlaces y posiciones de los mismos en la estructura general 16:0; 18:1 (9); 18:2 (9,12), mientras en la notación ω se utiliza cuando existen dobles enlaces en la molécula, ya que indica la posición del primer doble enlace, considerando desde el carbono más alejado del extremo carboxi terminal 18: ω 19, 18:3 ω 3.

Existe una clasificación simple para los aceites y las grasas alimentarias que depende de la fuente de la cual se extrae; sin embargo, en función de su actividad metabó-

lica o estructural se clasifican de acuerdo con el número de enlaces tipo éster que presenta una configuración: saturadas o insaturadas. Según lo anterior, los ácidos grasos saturados son los que no poseen dobles enlaces, los ácidos grasos monoinsaturados son los que poseen un doble enlace y los ácidos grasos poliinsaturados, los que poseen dos o más dobles enlaces.

5.2.1. Ácidos grasos saturados

Los ácidos grasos saturados pueden provenir de fuentes alimentarias animales o vegetales, en su estructura tienen una variación en el número de átomos de carbono, los cuales se encuentran unidos a través de enlaces simples; de esta manera, podemos encontrar ácidos grasos saturados de cadena corta (3 a 7), de cadena media (8 a 13) y de cadena larga (14 o más átomos de carbono). En la tabla 5.2 se presentan los ácidos grasos saturados que se encuentran comúnmente en algunos alimentos (Waehler, 2023).

Tabla 5.2. Nombre común, número de átomos y fórmula general de los principales ácidos grasos saturados en algunos alimentos

Nombre común	Número de átomos carbonos	Fórmula general	Alimentos
Butírico	C4:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$	Grasa de la leche
Láurico	C12:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	Aceite de coco y palmiste
Mirístico	C14:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	Lácteos, aceite de palma
Palmítico	C16:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	Aceites de palma, girasol, la mayoría de las semillas y grasas animales
Esteárico	C18:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	
Araquídico	C20:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$	Nueces y maní
Behénico	C22:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{20}\text{COOH}$	Semillas de moringa
Lignocérico	C24:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{22}\text{COOH}$	Cacahuates

Fuente: adaptado de Fennema et al. (2019).

5.2.2. Ácidos grasos insaturados

Los ácidos grasos insaturados provienen principalmente de fuentes vegetales y especies marinas, son compuestos que tienen una alta reactividad química debida a los dobles enlaces que conforman la cadena de átomos de carbono, los que presentan un solo enlace doble se denominan monoinsaturados, mientras que los que poseen dos o más se conocen como poliinsaturados.

Los enlaces insaturados en los ácidos grasos presentan dos tipos de isomerismo: *cis-trans* y posicional, según sea la localización de la doble ligadura en la cadena de átomos de carbono. Aunque naturalmente la mayoría de ellos son *cis*, para la industria alimentaria y el uso en procesos de transformación como la hidrogenación, los *trans* son termodinámicamente más estables y su comportamiento es semejante a un ácido graso saturado (Waehler, 2023).

Por otro lado, el isomerismo posicional se relaciona con la localización de las dobles ligaduras en la cadena hidrocarbonada, generalmente se indica con la letra griega omega y un número; a este grupo pertenecen los omega-3, omega-6 y omega-9, designando en qué enlace se encuentra la insaturación. El ácido oleico (tabla 5.3), por ejemplo, se denomina omega-9 o *cis*-9-octadecenoico, es conocido como el ácido graso más común en los alimentos, componente principal de la trioleína y que se encuentra en el aceite de oliva (Casale et al., 2023). El ácido oleico también se encuentra en semillas oleaginosas como el zapallo, representado en un 60,15 % (Valdés et al., 2024).

Tabla 5.3. Nombre común, número de átomos y fórmula general de los principales ácidos grasos insaturados y poliinsaturados en algunos alimentos

Nombre común	Número de átomos carbonos	Fórmula general	Alimentos
Palmitoleico	9C-16:1	$C_{15}H_{29}COOH$	Aceites marinos, aceite de semillas de macadamia y otras semillas
Oleico*	9C-18:1	$C_{17}H_{33}COOH$	Aceite de oliva y en menos porcentaje en aceites de girasol, canola y cártamo



Nombre común	Número de átomos carbonos	Fórmula general	Alimentos
Erúcico	13C-22:1	$C_{21}H_{39}COOH$	Aceite de semillas de colza
Linoleico*	18:2 n- 6	$C_{17}H_{31}COOH$	Aceites de semillas de linaza
Araquidónico	20:4n-6	$C_{19}H_{31}COOH$	Grasas de huevo y pescado
α -linolénico*	18:3n-3	$C_{17}H_{29}COOH$	Aceites de semillas de canola
Docosahexaenoico* (DHA)	22:6n-3	$C_{21}H_{31}COOH$	Pescados de mar y salmón

* Ácidos grasos esenciales de la serie omega 3, 6 y 9

Fuente: adaptado de Fennema et al. (2019).

Es importante indicar que existen los ácidos grasos esenciales, los cuales el organismo no puede sintetizar, debido a que no presenta las enzimas necesarias para los dobles enlaces después del carbono nueve (C9), y debido a que estos son indispensables para las funciones adecuadas deben formar parte de la dieta humana; allí se encuentran los ácidos linoleico, alfa linolénico y el DHA (Pakiet et al., 2022).

Durante los últimos años, las plantas con semillas oleaginosas han sido objeto de mejoramiento genético vegetal, lo que ha permitido modificar los perfiles de ácidos grasos contenidos en estas; por ejemplo, semillas de soya que presentan mayor porcentaje de oleico y bajo linolénico, así mismo en el aceite de palma se encuentran variedades o híbridos con alto contenido de ácido oleico y menos contenido de palmítico y esteárico (ácidos grasos saturados) (Kaur et al., 2022; Waehler, 2023).

5.3. ACEITES Y GRASAS EN LOS PRINCIPALES ALIMENTOS

La ingesta de aceites y grasas alimentarias es importante desde el punto de vista calórico y del desarrollo de las funciones biológicas (Ortiz-Grisales y Valdés-Restrepo, 2019). Cada gramo de lípido genera aproximadamente 9 kilocalorías en la ingesta de una persona, mucho mayor al que aportan carbohidratos y proteínas; en cuanto a sus funciones biológicas y nutricionales, son esenciales en los mecanismos de absorción de las vitaminas liposolubles, son cofactores, pigmentos, transportadores,

hormonas y mensajeros en los procesos fisiológicos celulares (colesterol y fosfolípidos) (Lorenzo et al., 2022).

Por otra parte, conocer el perfil de los aceites y grasas contenidos en un alimento, permite expresar la calidad de los lípidos que contiene, en función de la proporción de ácidos grasos, de acuerdo con las características de saturación o insaturación, lo cual permite la mezcla de diferentes materias primas o la determinación de una dieta a partir de su cuantificación (Grundy y Wilde, 2021).

5.3.1. Grasas de la leche

En la leche de vacuno, los triacilglicerolos están presentes como glóbulos de grasa que tienen un tamaño de 2 a 6 micras de diámetro; en su composición, estos contienen tres ácidos grasos diferentes, con un átomo de carbono asimétrico en la posición *sn*-2 del esqueleto del glicerol. Adicionalmente, se han identificado cerca de 400 ácidos grasos diferentes, no obstante, los principales son el ácido palmítico (43,7 %), el ácido esteárico (18 %), el ácido oleico (5 %) y el ácido butírico (4 %) y al menos diez ácidos grasos más que se concentran en una composición del 1 % (Lorenzo et al., 2022).

Aunque los principales ácidos grasos de la grasa de la leche son el palmítico, el oleico y el esteárico, esta grasa es la única de origen animal que contiene cantidades significativas de los ácidos grasos de cadena corta; la relación de saturados en insaturados no varía mucho, debido a que estos se sintetizan en el rumen del ganado, se convierten en ácidos grasos trans naturales, como producto de la biohidrogenación, no obstante, esta composición depende también de factores como la dieta (Argüeso Armesto et al., 2011).

En tecnología de alimentos, la grasa de la leche se trata para homogeneizar el glóbulo de grasa en la obtención de leche entera, esto se realiza debido a las reacciones químicas o cambios físicos indeseables que pueden surgir en almacenamiento, también se concentra por separación centrífuga para obtener la crema de leche y se aísla para obtener la mantequilla: una emulsión de agua en aceite, obtenida por la inversión de las fases de la leche, la cual se estabiliza por las proteínas lácteas, su característica física principal es la dureza y solidez a temperatura de refrigeración (4 °C).

La grasa láctea, en general, aporta propiedades físicas como el aspecto, la textura, el aroma y la estabilidad de los productos derivados lácteos, los cuales, por nor-

mativa presentan un perfil lipídico estandarizado, dado que los diferentes procesos solo modifican la concentración, manteniendo la proporción de las diferentes fracciones; esto garantiza que sus propiedades fisicoquímicas sean poco variables, especialmente el pH, la acidez, el aroma y la estabilidad microbiológica deseable (Álvarez Ramírez et al., 2021).

El contenido de la grasa de la leche se puede determinar a través de diferentes ensayos químicos, se realiza a la materia prima y a los productos derivados de su procesamiento para el control de calidad de la industria láctea. Algunos ensayos comunes se basan en medir la grasa separada, después de destruir su estado globular, o mediante la extracción de la grasa por medio de un disolvente, un clásico análisis de grasa de leche se conoce como el método del butirómetro de Gerber.

Este método se aplica de manera rutinaria para la leche y sus derivados, con un contenido en materia grasa de entre 0 % y 16 %. Para realizar el ensayo se requiere de un medidor llamado butirómetro (figura 5.3), el cual mide el volumen e indica el porcentaje másico. La muestra se trata con ácido sulfúrico concentrado entre el 90 % y el 91 % de masa y densidad (20 °C) 1,818 + 0,003 g/mL y alcohol amílico (2-metilbutanol), estos permiten romper la membrana de fosfolípidos y proteína de la envoltura del glóbulo de grasa, al final resulta una línea divisoria clara entre la grasa y la solución ácida que se separa a través de centrifugación, en el butirómetro se lee directamente el contenido en grasa expresado en gramos/100 g de muestra (Durán, 1999).

Figura 5.3. Medidor butirométrico de Gerber



Fuente: Ermatinger (2023).

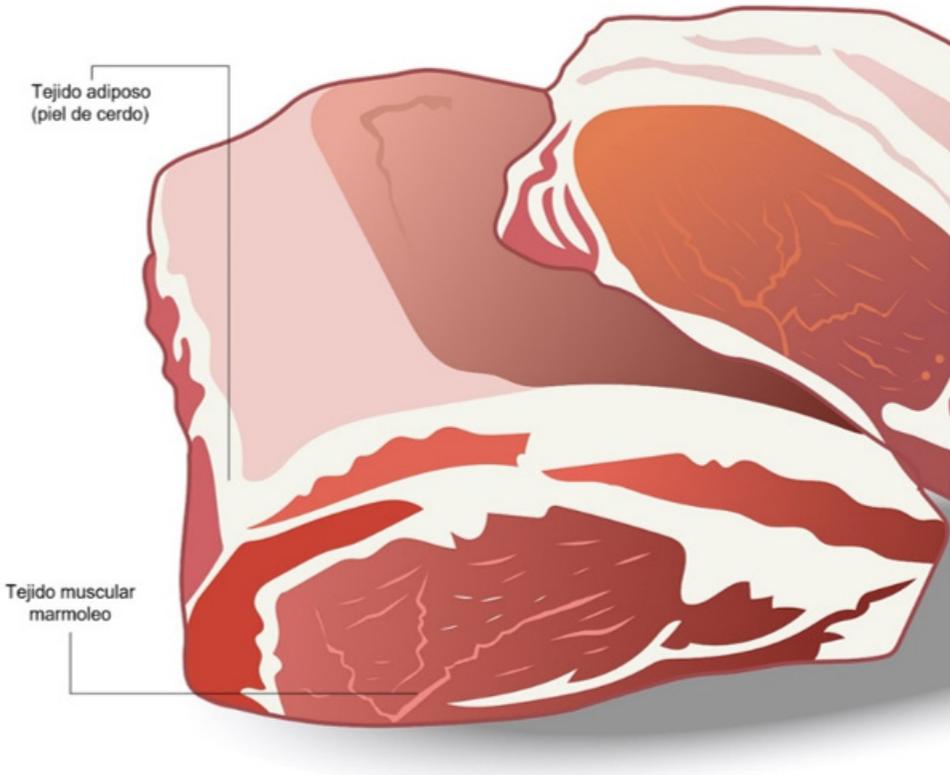
5.3.2. Grasa de las carnes y aceites marinos

La grasa presente en el tejido muscular o tejido adiposo de origen animal se clasifica de acuerdo con la distribución en el sistema muscular, esta es una variación que genera una composición lipídica diferente en cada corte de carne roja proveniente de los mamíferos o blanca proveniente de aves, peces y mariscos. Así por ejemplo la grasa presente en el músculo tiene mayor contenido de fosfolípidos (grasa estructural de la membrana celular), mientras que los lípidos del tejido adiposo contienen más triglicéridos de grasas saturadas (Angelovičová et al., 2021).

El contenido de grasa en el músculo es alrededor del 4 % del peso total de la célula de los mamíferos y menor al 1 % en el tejido muscular de los pescados que se clasifican como magros, los lípidos más importantes son los triacilgliceroles, el colesterol y los fosfolípidos, principalmente la fosfatidilcolina (lecitina). Por su parte, en el tejido adiposo, la cantidad de grasa acumulada depende de diferentes factores, especialmente el tipo de nutrición del animal, la actividad física y factores fisiológicos que funcionan en los músculos específicos, la grasa generalmente se encuentra en el abdomen (panceta) y debajo de la piel (tocino), en las carnes que no son magras y finalmente también se encuentra en menor proporción alrededor del músculo, esto se conoce como carne marmoleada (grasa entreverada). En la figura 5.4 se presenta un esquema de corte de cerdo donde se señala la ubicación de cada uno de los tejidos adiposo y muscular (Kaur et al., 2022).

La grasa presente en el tejido muscular o tejido adiposo de origen animal se clasifica de acuerdo con la distribución en el sistema muscular, esta es una variación que genera una composición lipídica diferente en cada corte de carne roja proveniente de los mamíferos o blanca proveniente de aves, peces y mariscos.

Figura 5.4. Corte de lomo de cerdo en el que se muestra el tejido adiposo (piel de cerdo) y tejido muscular con lo que se denomina marmoleo (grasa entreverada)



Fuente: Pixabay, 2022.

El tipo de ácidos grasos presente en este tejido muscular o adiposo también depende de la especie (tabla 5.4), en el pescado se encuentra mayor cantidad de ácidos grasos insaturados, por esto generalmente se habla de aceites marinos, mientras que en la carne vacuna se presenta mayor contenido de ácidos grasos saturados (Lorenzo et al., 2022; Argüeso Armesto et al., 2011).

Tabla 5.4. Contenido de grasa y composición para diferentes tipos de carne

Especie	Músculo	Contenido de grasa	Ácidos grasos	Tipo de grasas
Vaca	Rojo magro	4-8 %	Saturados 40-71 %	Fosfolípidos 22 % Colesterol 78 %
	Tejido adiposo	30-40 %	Insaturados 1-6 %	
Cerdo	Blanco magro (lomo)	8-11 %	Saturados 39-49 %	Fosfolípidos 21 % Colesterol 79 %
	Adiposo (tocino)	71-85 %	Insaturados 3-18 %	Triglicéridos 4,6 %
Pollo	Blanco	4,7 %	Saturados 28-33 % Insaturados 14-23 %	Fosfolípidos 48 % Colesterol 52 % Triglicéridos 2 %
Pescado	Rojo (salmón)	13-15 %	Saturados 30 % Insaturados 26-40 %	Fosfolípidos 7 % Colesterol 71 % Triglicéridos 6,2 %

Fuente: adaptado de Fennema et al. (2019).

En los pescados se encuentra una importante proporción de ácidos grasos de la serie omega-3 en una cantidad variable, que depende de la especie, tipo de producción y origen. Especialmente se considera la pesca de mar la de mayor proporción de los ácidos grasos poliinsaturados de este grupo; el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el ácido docosahexaenoico (DHA), los cuales constituyen alrededor del 25 % de los ácidos grasos presentes en los aceites marinos (García-Moreno et al., 2021).

Los aceites marinos tradicionalmente los ha utilizado la industria de nutrición animal por ser fuente de energía y la industria de alimentación humana en la preparación de productos hidrogenados, tanto para uso doméstico como industrial, no obstante, son importantes por sus propiedades nutricionales, particularmente el



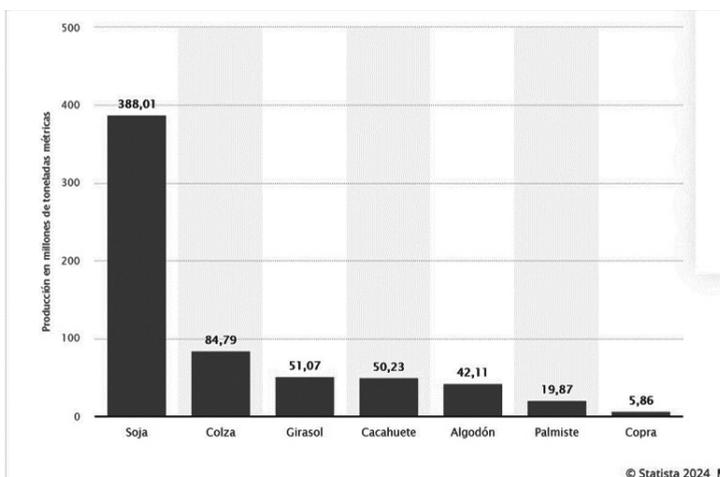
ácido docosahexaenoico (DHA), el cual se extrae para incorporarlo como suplemento alimentario por sus amplios efectos en la función celular y orgánica en los humanos (García-Moreno et al., 2021).

La obtención de aceites marinos no solo proviene de los peces, actualmente son numerosas las fuentes con alto potencial de desarrollo; comercialmente, es posible obtener aceites a partir de crustáceos como el krill (*Euphasia superba*), el cual se puede cosechar, someter a una prensa y obtener su aceite (Torzillo et al., 2021). Este es un aceite con alto contenido de fosfolípidos, alrededor del 40 % con una alta proporción de ácido docosahexaenoico. Otra fuente de aceites marinos con estas características son las microalgas, se cultivan especies como *Cryptocodinium*, *Mortierella* y *Schizochytrium*, las cuales producen alta concentración de fosfolípidos con mayor estabilidad a la oxidación y “sin olor a pescado”, por lo cual facilita su manejo tecnológico (Tommonaro y Tramice, 2023; Fleurence, 2021).

5.3.3. Aceites vegetales

Existen alrededor de cuarenta especies de semillas oleaginosas distintas, que pueden ser usadas para consumo humano y animal, sin embargo, un pequeño número de cultivos suplen la demanda de aceites vegetales. En la figura 5.5 se presentan las principales fuentes actuales de obtención de aceites comestibles.

Figura 5.5. Volumen de producción mundial de las principales semillas oleaginosas



Fuente: Statista (2024).

La soya (*Glycine max*) es el cultivo oleaginoso alimenticio más importante, contiene alrededor del 30 % de aceite, localizado en una pequeña estructura llamada esferosoma. Los esferosomas están dispersos entre las proteínas y tienen un tamaño de 0,2 a 0,5 micras de diámetro, el aceite se distribuye en la semilla con un 8 % en la testa, 90 % en los cotiledones y 2 % en los hipocótilos y la plúmula. El contenido de aceite y la composición de ácidos grasos en la soya tienen una mayor proporción de ácido palmítico, oleico, linoleico y linolénico (Lorenzo et al., 2022).

La colza (*Brassica napus L.*) es una planta que produce una semilla pequeña y redonda, generalmente de color negro, marrón o amarillo, con un contenido de aceite del 45 %, el cual se conoce como aceite de canola. Su contenido en ácidos grasos es: oleico (55 %), linolénico (20 %), palmítico (10 %) y esteárico (15 %), también se encuentran en menor proporción los ácidos gadoleico y erúxico (So y Duncan, 2021).

El girasol (*Helianthus annuus*) es un cultivo oleaginoso anual de gran importancia en la producción mundial de aceites de calidad. Esta planta originaria de América presenta una estructura conocida como aquenios, semillas de forma comprimida de base truncada en forma de diamante, que está conformada por una almendra que contiene entre el 50 % y el 60 % de aceite. El aceite de girasol contiene principalmente ácido oleico y ácido linoleico con un contenido porcentual hasta del 70 % (García, 2019).

La palma aceitera (*Elaeis guineensis*) es uno de los más importantes recursos vegetales en producción de palmiste, un aceite de uso alimentario e industrial, sus frutos presentan forma y tamaño variables alrededor de 2,5 cm de diámetro y peso entre 20 y 30 g que contienen en el mesocarpio entre el 45 % y el 55 % de aceite. La composición de ácidos grasos es principalmente: saturados, representado en ácido palmítico y esteárico, los insaturados son el oleico y linoleico, en menores cantidades (Agro-Processing and Food Engineering, 2022).

Otras fuentes vegetales de interés para obtención de aceites son el coco, el maíz, el zapallo y las oleínas de algodón, en estas especies la composición de ácidos grasos principalmente es de insaturados, resultantes de la digestión enzimática de los triglicéridos que son más polares y, por tanto, facilitan los ácidos grasos libres que generalmente son más inestables en el procesamiento, lo cual permite su consumo culinario y directo, tal como el aceite de oliva, una fuente importante desde el punto de vista nutricional, este se obtiene de las aceitunas, que mediante procesos de refinado físico-mecánicos: como el prensado y la destilación, extrae el aceite sin alterar la composición de los ácidos grasos presentes. El aceite se caracteriza por

su alto contenido en oleico y un valioso contenido de ácido linoleico. En la tabla 5.5 se presentan los principales ácidos grasos y su composición en diferentes fuentes vegetales (Lorenzo et al., 2022).

Tabla 5.5. Principales ácidos grasos y su composición en diferentes fuentes vegetales

Fuente	Saturados			Insaturados		
	Láurico (C:12)	Mirístico (C:14)	Palmítico (C:16)	Oleico (9C-18:1)	Linoleico (9C-18:2)	Linolénico (9C-18:3)
Soya	-	-	15 %	20 %	64 %	3 %
Oliva	-	-	10 %	75 %	10 %	-
Algodón	-	-	23 %	32 %	45 %	-
Maní	-	-	9 %	51 %	26 %	-
Coco ^a	45 %	20 %	5 %	3 %	6 %	-
Palma	8 %	50 %	15 %	8 %	15 %	1 %

^aGrasa sólida a temperatura ambiente

Fuente: adaptado de Fennema et al (2019).

5.4. REACCIONES QUÍMICAS

Los aceites y grasas en los alimentos presentan propiedades físicas y químicas que permiten variar su composición, propiedades de fusión y su capacidad de asociación con el agua y otras moléculas no lipídicas. Durante el procesamiento, el almacenamiento y la manipulación de los alimentos con alto contenido de grasas, se pueden presentar reacciones con otros componentes, factores internos o externos, que pueden ser favorables y otros desfavorables para la calidad final del producto alimentario.

5.4.1. Lipólisis

Se conoce como lipólisis a la reacción que ocasiona el rompimiento o hidrólisis del enlace éster del triglicérido y sus ácidos grasos. De forma natural puede ser ocasionado por enzimas lipolíticas presentes en la matriz alimentaria o por la acción de las enzimas de microorganismos contaminantes. Durante el procesamiento, ocurre por la acción de altas temperaturas, la molienda y el agua, generando con mayor facilidad la autooxidación por los ácidos grasos liberados (Enríquez Meza, 2023).

La liberación por hidrólisis de ácidos grasos de cadena corta es la responsable de la aparición de rancidez hidrolítica en leche. En los aceites de semillas es más fácil encontrar ácidos grasos libres, debido a la lipólisis, por lo que se deben someter a la neutralización (Enríquez Meza, 2023).

5.4.2. Oxidación

La oxidación se produce cuando un átomo cede un electrón a otro átomo distinto mediante el proceso de reducción. En los aceites y grasas alimentarios se oxidan principalmente los ácidos grasos insaturados, los cuales sintetizan sustancias de bajo peso molecular que confieren el olor típico de grasa oxidada (Suaterna Hurtado, 2011).

Existen factores que promueven o inhiben la oxidación: entre los promotores de esta reacción están las altas temperaturas, la presión del oxígeno, la poliinsaturación y las enzimas lipolíticas; otros factores, como la refrigeración, los antioxidantes, el escaldado y la hidrogenación, son inhibidores de la reacción. No obstante, estos factores actúan dependiendo de la distribución de los lípidos en el alimento y su área de exposición. Por ejemplo, en una margarina, la fase continua está en contacto con el aire, por lo tanto, es más propensa a la oxidación (Ahmed et al., 2016).

Como consecuencia de la oxidación de los aceites se forman los hidroperóxidos, los cuales son productos primarios inestables, que participan en numerosas y complejas reacciones, que producen nuevos compuestos y radicales libre, estos se polimerizan e incrementan la viscosidad y su ruptura genera aldehídos, cetonas, ácidos y otros compuestos de bajo peso molecular. Es común que estas reacciones ocurran durante la fritura, varios estudios han demostrado que los productos secundarios de la oxidación de la grasa durante la fritura tienen efectos adversos resultantes de sustancias altamente reactivas y tóxicas que pueden modificar proteínas, ácidos nucleicos y otras biomoléculas (Suaterna Hurtado, 2011).

5.4.3. Polimerización

Es una reacción en la que una grasa forma moléculas de mayor tamaño y peso molecular, ocurre en los puntos de insaturación de las cadenas de los ácidos grasos o en el enlace éster con la molécula de glicerol, se presenta durante procesos de fritura generalmente a temperaturas mayores a los 190 °C. La polimerización se observa con la aparición de gomas y espuma sobre la superficie del aceite (Casale et al., 2023).

5.4.4. Esterificación e interesterificación

Esta reacción se puede considerar inversa a la lipólisis, forma enlaces éster entre los ácidos grasos libres y el glicerol, se expresa como un intercambio o migración de radicales de ácidos grasos de una grasa a otra. Mediante esta reacción se pueden eliminar glicéridos trisaturados por cristalización, lo que permite la producción de aceites artificiales a partir de grasas sólidas. La interesterificación se puede llevar a cabo calentando la grasa a temperaturas relativamente altas (mayores a 200 °C) durante un largo tiempo. Sin embargo, en general, se utilizan catalizadores que permiten completar la reacción en poco tiempo a una menor temperatura, se requiere que el aceite que se va a esterificar no tenga agua y no presente ácidos grasos libres, peróxidos y otras sustancias que puedan reaccionar con el catalizador (Badui Dergal, 2016).

5.4.5. Isomerización e hidrogenación

Debido a que los ácidos grasos insaturados pueden existir en la configuración cis o trans, dependiendo de la posición de los átomos de hidrógeno y unión a los átomos de carbono, están sujetos a tres transformaciones que, en orden de importancia, son: saturación de las dobles ligaduras, isomerización geométrica cis-trans e isomerización posicional, esta última se conoce como hidrogenación (Badui Dergal, 2016).

La hidrogenación es un proceso que inyecta hidrógeno gaseoso a una presión máxima de cuatro atmósferas, en presencia de un catalizador y con agitación constante se solubiliza la mayor cantidad posible del gas en la grasa. Al finalizar el proceso, la grasa hidrogenada se obtiene al enfriarla por encima del punto de fusión, esta es la base para la elaboración de margarinas, mantecas y demás productos grasos semisólidos (Badui Dergal, 2016).

5.5. PROCESAMIENTO

La extracción de aceite de semillas oleaginosas comienza con la reducción de tamaño a través de la molienda, una operación unitaria que permite aumentar la superficie de extracción y facilitar la siguiente fase que consiste en extracción química, utilizando generalmente hexano comercial. El fluido que sale de la fase de extracción es una mezcla de aceite y solvente, que se denomina micela, el 90 % del solvente contenido en la micela se recircula para recuperación, el excedente se remueve por separación a temperaturas superiores al punto de ebullición del hexano.

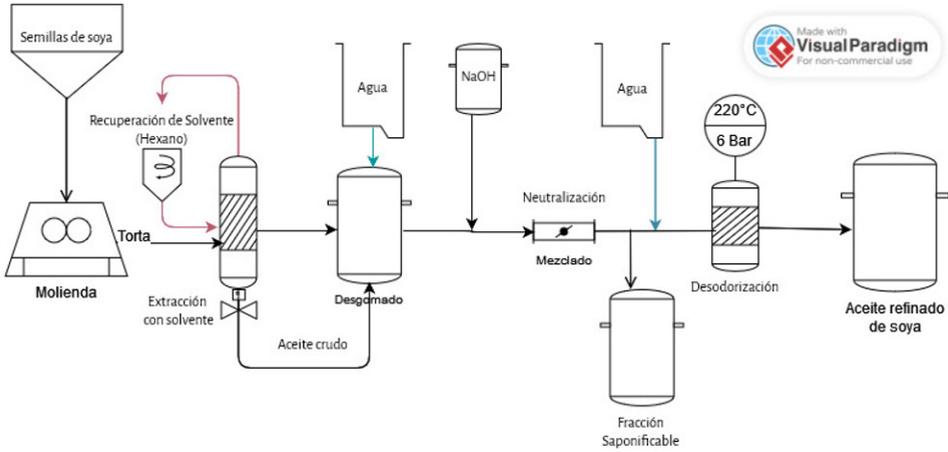
A continuación, el aceite que sale de la columna es aceite crudo, el cual se somete a refinado para diferentes aplicaciones; durante el refinado se remueven fosfolípidos y los ácidos grasos libres en el aceite crudo. Este proceso se realiza en dos etapas:

Desgomado: este proceso libera el aceite de materiales proteicos, fosfolípidos e hidratos de carbono, consiste en adicionar 2 % de agua, con agitación de la mezcla a 50 °C.

Neutralización cáustica: es una reacción alcalina utilizada durante el procesamiento de grasa y aceites, se realiza para eliminar los ácidos grasos libres, mezclando el aceite caliente con soda cáustica, luego se deja hasta que sedimente; los residuos de sales sódicas de los ácidos grasos que permanecen después de retirar la fase acuosa se eliminan, y el aceite queda neutralizado por lavado con agua caliente, seguido de una centrifugación. La fase acuosa resultante generalmente se utiliza para elaborar jabones.

Durante el proceso de refinación se adiciona al aceite una solución alcalina de hidróxido de sodio (NaOH), esta solución reacciona con los ácidos grasos libres para producir jabón (fracción saponificable). Muchos aceites por su contenido de pigmentos en ocasiones no deseables en el proceso se someten a blanqueo, utilizando minerales naturales o activados con ácido, que absorbe estos compuestos y descompone los hidroperóxidos formados (Lorenzo et al., 2022).

Finalmente, se realiza una desodorización que elimina los compuestos volátiles como aldehídos y cetonas, este es un proceso unitario de destilación con arrastre de vapor que se lleva a cabo a bajas presiones (2-6 mbares) y altas temperaturas (180-220 °C). En la figura 5.6 se presenta el flujograma de extracción y refinamiento para la obtención de aceite de soya.

Figura 5.6. Flujograma de extracción y refinamiento de aceite de soja

Fuente: elaboración propia.

Durante el procesamiento, las grasas y los aceites se emplean ampliamente para elaborar diversos alimentos, son parte principal de la matriz alimentaria o conforman un sistema, desarrollando aromas, sabores y funciones nutritivas. La mantequilla, por ejemplo, se obtiene de la grasa o crema de la leche, con la cual se forma una emulsión de agua en aceite y se obtiene por la inversión de fases de la crema estabilizada por las proteínas lácteas, como resultado del batido (malaxado), allí se rompen los glóbulos de grasa y se produce la unión y la formación de una fase continua de grasa en la que se dispersa el agua en pequeñas gotas. La característica principal de la mantequilla es que es un alimento duro y poco untable a temperaturas de refrigeración (Albisu Aguado y Fernández Gil, 2008).

Por su parte, las margarinas obtenidas de aceites vegetales son una emulsión de agua en aceite que se obtiene por cristalización, en la que la fase dispersa de agua queda contenida en una matriz cristalina de triacilglicéridos a manera de red; para la fase grasa se emplean mezclas de aceites, tanto hidrogenados como sin hidrogenar. Durante la hidrogenación industrial de los aceites se produce algo de isomerización de los dobles enlaces, los ácidos grasos trans representan el 20 %- 40 % de los ácidos grasos totales en la margarina y otras grasas plastificantes; sin embargo, estos no tienen una función biológica equivalente a sus isómeros cis, por lo cual su consumo afecta de manera variable el metabolismo de las grasas en el organismo humano.

Otro producto alimentario de alto contenido graso es la mayonesa, una emulsión de aceite (80 %) en agua. Para la formación de una emulsión se requiere un emulsificante, generalmente se utiliza la yema de huevo, debido a su contenido de lecitina, una mezcla de glicerofosfolípidos. Adicionalmente, se requiere la energía mecánica, suministrada para formar y romper glóbulos; mediante agitación constante se pueden generar fuerzas de cizalla suficientes para generar gotas con menor diámetro que permiten formar una película interfase para estabilizar la emulsión.

En los helados y cremas de repostería, las grasas desempeñan una función estructural que otorga textura, cremosidad y sabor. En el helado, la estructura es una espuma sólida de células de aire cubiertas por una grasa emulsificada en una red de cristales de hielo. Para su fabricación se utiliza la grasa de la leche o de aceites vegetales hidrogenados en un porcentaje de hasta el 14 %. Por su parte, las grasas que se utilizan en repostería son semisólidas, también proporcionan textura, debido a que favorecen la aireación de los productos, cubriendo las proteínas del gluten de la harina que impiden el endurecimiento (Shahidi y Hossain, 2022).

Un uso importante de los aceites y grasas en la industria es en la deshidratación de alimentos por fritura, este tipo de alimentos tienen alta demanda de consumo, por su aroma y textura crujiente. Existen muchas variables que afectan el proceso, entre ellas la aparición de compuestos indeseables (aldehídos, cetonas, ácidos, gomas, etcétera) por el exceso de temperatura.

En la fritura, el alimento entra en contacto con el aceite precalentado entre 150 y ± 180 °C y se exponen al aire durante tiempos variados, el agua contenida en el alimento se remueve parcial o casi totalmente, por lo cual el alimento absorbe entre el 5 % y el 40 % de grasa en función de su peso, un factor importante que se debe considerar en los procesos de fritura son las características fisicoquímicas del aceite, tales como el índice de yodo, punto de ebullición, punto de humo, entre otros. En la tabla 5.6 se presentan la temperatura de fusión y punto de humo de diferentes grasas y aceites utilizados para fritura (Suaterna Hurtado, 2011).

En los helados y cremas de repostería, las grasas desempeñan una función estructural que otorga textura, cremosidad y sabor. En el helado, la estructura es una espuma sólida de células de aire cubiertas por una grasa emulsificada en una red de cristales de hielo.

Tabla 5.6. *Temperatura de fusión y punto de humo de diferentes grasas y aceites utilizados para fritura*

Tipo de aceite	Temperatura de fusión (°C)	Punto de humo (°C)	Estabilidad
Aceite de palma	10	215	Alta
Manteca de cerdo	33	185-205	Moderado
Aceite de girasol	-18	225-245	Alta
Aceite de coco	25	175	Moderado
Aceite de soya	-16	257	Alta

Fuente: adaptado de Badui Dergal (2016).

5.6. ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS DE ACEITES Y GRASAS ALIMENTARIAS

Los aceites y grasas alimentarias cumplen con parámetros de calidad de acuerdo con la norma alimentaria relacionada, la cual señala los estándares para características como el contenido de humedad, presencia de impurezas y composición de ácidos grasos libres; igualmente los valores de índice de yodo (I) o índice de acidez, por ejemplo, permiten determinar si el aceite es crudo, semirrefinado o refinado, otros indicadores importantes señalan si existe adulteración en el aceite alimentario.

Los métodos químicos de detección más utilizados en la industria incluyen la determinación de:

- El índice de acidez y de hidroxilo: para la acidez se cuantifican los mg de KOH necesarios para saponificar los ácidos grasos libres, calculados en términos del ácido oleico. Para el contenido de hidroxilo se cuantifican los mg de KOH necesarios para neutralizar el ácido acético combinable por acetilación con 1 g de muestra.

- El índice de yodo: cuantifica los mg de yodo que reaccionan y que reflejan el promedio de insaturaciones, un alto índice de yodo señala una baja estabilidad y bajo punto de fusión de la grasa.
- El índice de saponificación: cuantifica los mg de KOH para saponificar 1 g de grasa; es inversamente proporcional al peso molecular promedio de los ácidos grasos.
- El índice de solidificación de ácidos grasos: determina la temperatura a la que los ácidos grasos cristalizan al enfriarse lentamente, esta información es importante para el proceso de hidrogenación.
- El índice de peróxido: es una medida del contenido de oxígeno reactivo, expresada en términos de miliequivalentes (mEq) de oxígeno por kg de grasa, por lo tanto, es un indicador significativo del grado de oxidación del aceite, ocasionado por factores que hayan empezado a afectar su estabilidad.

Las características organolépticas y los siguientes métodos físicos son requeridos para determinar aspectos de calidad en aceites y grasas:

- Aspecto, color, olor y sabor: busca principalmente determinar en la muestra homogeneidad, limpieza y transparencia de manera perceptible a los sentidos. Por colorimetría se puede determinar además la presencia de pigmentos o resinas indeseables.
- Peso específico: se determina la masa de la unidad de volumen en g/cc a una temperatura dada por picnometría a 25 °C para aceites y a 60 °C para grasas.
- Temperatura de fusión: *slip point* es un método común que utiliza tres capilares de vidrio que se llenan con la grasa, se calientan en baño maría a razón de 1 °C por minuto, hasta que esta se desplaza hacia arriba; se calcula el valor con el promedio de las tres temperaturas.
- Punto de humo: se determina a partir de los compuestos volátiles que se desprenden de la fritura del aceite, al empieza a humear. La acroleína es el primer compuesto que empieza la combustión y sus humos indican que se ha alcanzado el punto de humo del aceite.

- Prueba de frío: determina la eficiencia de la grasa para la estabilidad a 0 °C, a esta temperatura un contenido de triglicéridos con alto punto de fusión genera turbidez, por lo tanto, si un aceite se mantiene transparente por alimentos cinco horas y media, se considera de mayor calidad.
- El índice de refracción: en los aceites este valor se encuentra entre $1,46 \pm 1,5$ alrededor de los 15 o 20 °C. Es un indicador rápido del grado de insaturación, útil para el proceso de hidrogenación y la determinación del índice de yodo.

5.6.1. Normativa para aceites y grasas comestibles en Colombia

El Comité Técnico 49 - de aceites y grasas vegetales y animales comestibles, del Icontec en Colombia, desarrolla las normas de productos grasos de origen animal y vegetal destinados al consumo humano, incluyendo el muestreo, limpieza, higiene y métodos de ensayo. En la tabla 5.7 se presentan las principales normas técnicas colombianas ratificadas para esta industria.

Tabla 5.7. Principales normas técnicas colombianas ratificadas para la industria de aceites y grasas alimentarias

Código NTC	Nombre	Contenido
NTC 217:2009	Muestreo	Describe los métodos de muestreo para grasas y aceites animales y vegetales, crudos o procesados.
NTC 5658:2009	Determinación de la estabilidad a la oxidación (ensayo de oxidación acelerado)	Especifica un método para determinar la estabilidad a la oxidación de grasas y aceites en condiciones extremas que inducen una oxidación rápida: alta temperatura y flujo de aire elevado. No permite la determinación de la estabilidad de grasas y aceites a temperatura ambiente, pero sí la comparación de la eficacia de los antioxidantes agregados a las grasas y aceites.

Código NTC	Nombre	Contenido
NTC 431:2009	Aceite crudo de palma africana (<i>E. guineensis</i>).	Establece los requisitos fisicoquímicos que debe cumplir y los métodos de ensayo a los cuales debe someterse el aceite crudo de palma africana (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.)
NTC 198:2009	Manteca	La manteca se define como toda grasa, simple o compuesta, sólida o semisólida a la temperatura ambiente, de origen animal, vegetal o mezcla de ambas, que cumple los requisitos de esta norma.
NTC 250:2009	Margarina industrial	Establece los requisitos fisicoquímicos y microbiológicos que debe cumplir y los métodos de análisis a los cuales debe someterse la margarina industrial.
NTC 241:2009	Margarinas y esparcibles para uso en mesa y cocina	Establece los requisitos fisicoquímicos y microbiológicos para las margarinas para uso en mesa y cocina.
NTC 400:2010	Mezcla de aceites vegetales comestibles	Establece los requisitos y los ensayos que deben cumplir las mezclas de aceites vegetales comestibles.
NTC 4380:2009	Aceites comestibles saborizados	Aplica a las mezclas de aceites vegetales comestibles saborizados y a los aceites vegetales comestibles puros saborizados.

Fuente: adaptado de Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Icontec (2024).



FUNDAMENTOS DE BIOTECNOLOGÍA ALIMENTARIA

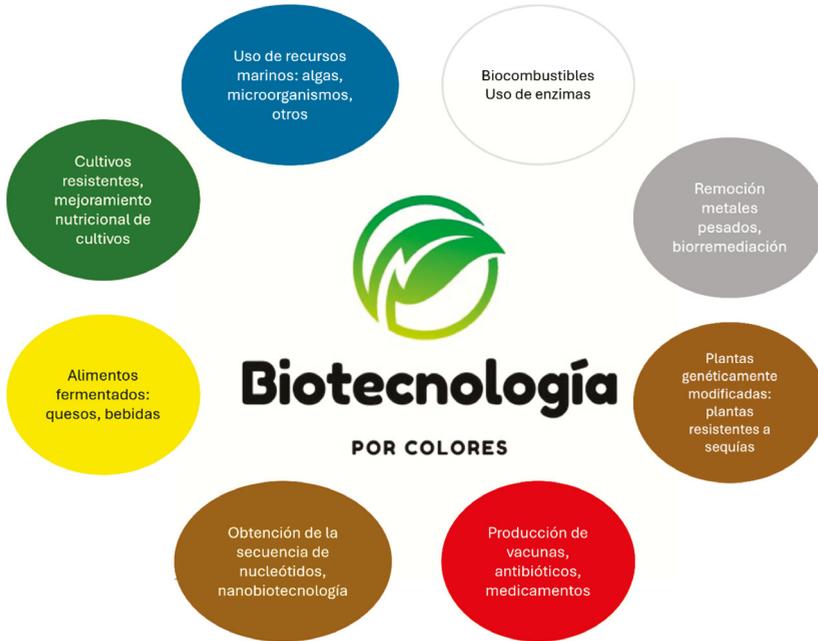
LILIANA LONDOÑO HERNÁNDEZ

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el contexto, la biotecnología puede tener diferentes definiciones, así como también se puede agrupar de acuerdo con sus aplicaciones. Desde el punto de vista tecnológico, la biotecnología se define como el conjunto de herramientas que usa organismos vivos, sus partes o sus componentes para la obtención de productos de valor agregado. Actualmente, de acuerdo con sus aplicaciones, la biotecnología se agrupa en colores, sin embargo, esta agrupación evoluciona con el pasar de los años. Inicialmente se agruparon en cuatro colores: blanco, rojo, verde y azul; y hoy en día se describen nueve colores según su área de estudio (Figura 6.1). En la biotecnología blanca se estudia el desarrollo de productos y procesos industriales; la biotecnología gris está enfocada en procesos de recuperación ambiental, como por ejemplo la biorremediación; la biotecnología violeta se encarga de describir y establecer los protocolos para productos peligrosos; la biotecnología azul está orientada a las aplicaciones de los organismos marinos y sus derivados; la biotecnología verde se enfoca en las aplicaciones agrícolas; la biotecnología amarilla está enfocada a la producción de alimentos; la biotecnología dorada abarca dos áreas adicionales: la bioinformática y la nanobiotecnología; la biotecnología roja está relacionada con las aplicaciones médicas y, finalmente,

la biotecnología café incluye las investigaciones relacionadas con las plantas resistentes a sequías.

Figura 6.1. Ejemplos de aplicaciones de la biotecnología por colores

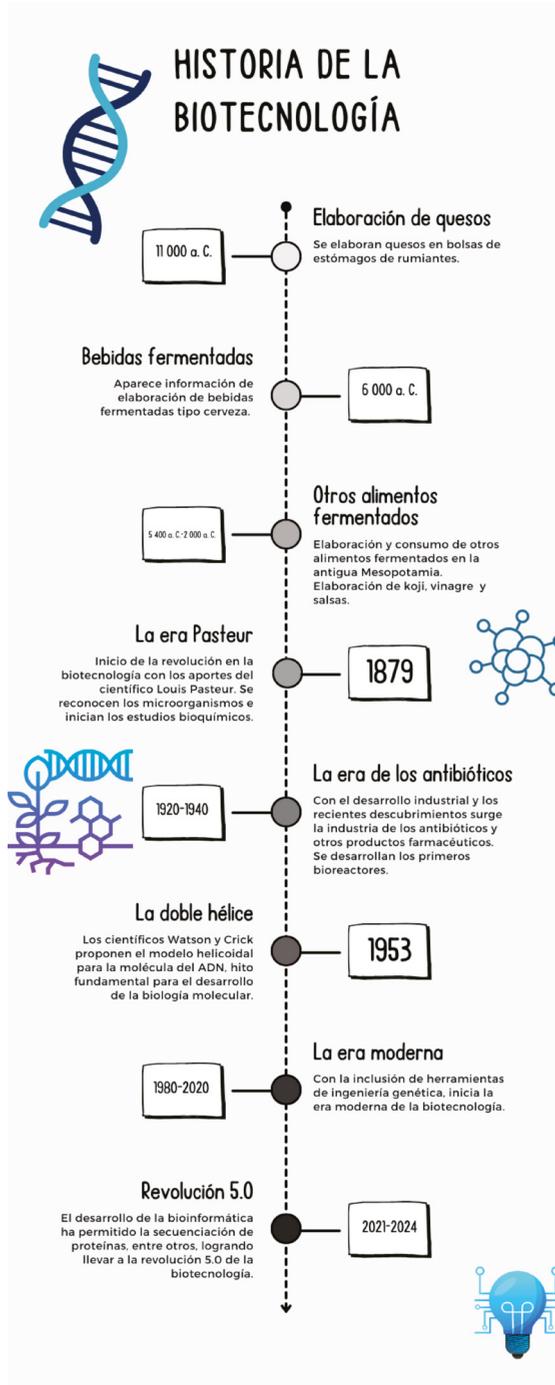


Fuente: elaboración propia.

Considerando lo mencionado anteriormente, es posible definir la biotecnología alimentaria como el uso de microorganismos vivos o sus partes a través de herramientas y técnicas, bajo los principios de la biología y la ingeniería, para la producción, procesamiento, conservación y mejora de alimentos. La biotecnología alimentaria se enmarca en la biotecnología amarilla e incluye la aplicación en diversos productos, tales como cárnicos, lácteos, cereales, vegetales, frutas, entre otros.

Durante el presente capítulo se revisarán algunos principios básicos de la biotecnología alimentaria y los procesos de transformación que dan origen a productos de la industria de alimentos.

Figura 6.2. Historia de la biotecnología alimentaria



Fuente: elaboración propia.



6.1. HISTORIA DE LA BIOTECNOLOGÍA ALIMENTARIA

Describir la historia de la biotecnología alimentaria puede llegar a ser complejo, dado que no se cuenta con datos exactos y, por tanto, implica hablar de la historia de la aparición de los productos fermentados, como el queso, la cerveza, el vino o el pan. La historia del queso se remonta hacia el 11 000 a. C., cuando un pastor, quien había guardado la leche en las bolsas hechas con los estómagos de los rumiantes, probó la pasta que se había producido por acción de las enzimas naturales y desde este momento se cree que, poco a poco, se fue desarrollando esta industria (Isique Huaroma, 2014). Hacia el 6000 a. C. se tienen referencias de la elaboración de la cerveza en la antigua Mesopotamia, mientras que algunos datos muestran que en el 5400 a. C. ya se elaboraba vino y pan (Rodríguez, 2022). Sin embargo, la evolución de la biotecnología alimentaria se dio después del siglo XIX, con las investigaciones de la fermentación desarrolladas por el científico Louis Pasteur. Gracias a estos trabajos desarrollados y al conocimiento en las dinámicas biológicas, se ha logrado la tecnificación de diferentes procesos, llegando hoy en día a la biotecnología moderna, la cual incluye el uso de ingeniería genética para mejorar, por ejemplo, microorganismos, obteniendo productos de mejor calidad en menor tiempo (Muñoz de Malajovich, 2012) (Figura 6.2).

6.2. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA BIOTECNOLOGÍA ALIMENTARIA

La biotecnología alimentaria se fundamenta en tres principios básicos: la bioquímica, la microbiología y la ingeniería. Desde la bioquímica se realiza el estudio de las moléculas que componen los alimentos y sus reacciones químicas. Con la microbiología se realiza el estudio de los microorganismos en los alimentos, su impacto en la calidad y seguridad alimentaria. Y desde la ingeniería se realiza el diseño y escalado de los procesos biotecnológicos para la producción de alimentos o materiales alimenticios.

La bioquímica es una disciplina fundamental que proporciona un entendimiento detallado de los procesos metabólicos durante la fermentación, permitiendo una descripción precisa de las transformaciones bioquímicas involucradas. Así mismo, esta ciencia permite describir la estructura compleja de las proteínas y los cambios que estas experimentan durante las diversas interacciones celulares. En el mismo sentido, la bioquímica es esencial para comprender el funcionamiento de la maquinaria enzimática presente en los microorganismos y sus roles específicos en las distintas reacciones. La comprensión de la bioquímica no solo beneficia la investi-

gación científica, sino que también tiene aplicaciones prácticas en la optimización de procesos industriales y la mejora de productos.

La microbiología es una disciplina fundamental para conocer los microorganismos, sus características, comportamiento y requerimientos nutricionales. La microbiología no solo proporciona información sobre los factores que afectan el crecimiento microbiano, tanto intrínsecos como extrínsecos, sino que también es indispensable para identificar y comprender los metabolitos generados durante los procesos de fermentación que se producen durante la fermentación. Esta disciplina no solo se limita a revelar la biología de los microorganismos involucrados, sino que también contribuye a optimizar y controlar los procesos fermentativos, por tanto, su comprensión detallada en la fermentación no solo soporta la investigación científica, sino que también es importante para el desarrollo industrial de los procesos.

La ingeniería es fundamental para el desarrollo y optimización de procesos de fermentación, aportando soluciones técnicas que mejoran la eficiencia y la escalabilidad de la producción. La aplicación de los principios de la ingeniería en la biotecnología alimentaria permite diseñar bioprocesos que cumplan con los requisitos específicos de los microorganismos o las enzimas involucradas, controlando factores como la temperatura, la concentración de nutrientes, la agitación, entre otros. Además, la ingeniería facilita la implementación de tecnologías avanzadas, como la automatización, el monitoreo en tiempo real o la ingeniería genética, logrando mejora en los rendimientos de proceso. La ingeniería impulsa el desarrollo de la biotecnología alimentaria, contribuyendo al avance sostenible y eficiente.

6.3. PROCESOS FERMENTATIVOS EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

La fermentación se puede definir como la transformación de una sustancia en otra utilizable a través de los procesos metabólicos de los microorganismos o por enzimas que catabolizan reacciones de óxido-reducción, las cuales generan la suficiente energía para los procesos metabólicos. Durante el proceso, se acumulan microorganismos o metabolitos de interés. En este sentido, los procesos de fermentación generalmente son llevados a cabo por bacterias, hongos o levaduras. Para llevar a cabo los procesos de fermentación se deben considerar tres elementos claves: el producto que se desea obtener, el microorganismo que se va a utilizar y los factores intrínsecos y extrínsecos del crecimiento del microorganismo.

De acuerdo con la ruta metabólica seguida a los procesos de fermentación se pueden dividir en dos tipos: a) fermentación oxidativa o aeróbica, la cual tiene lugar en presencia de oxígeno; en esta, el piruvato se oxida parcialmente a un compuesto orgánico reducido, tal como etanol, ácido láctico o ácido acético; en esta fermentación el oxígeno es el aceptor final de electrones; b) fermentación anaerobia, producida en ausencia de oxígeno, donde el piruvato no se oxida completamente; en esta fermentación el aceptor final de electrones es un compuesto orgánico, tal como el piruvato, el ácido fórmico o el ácido succínico. Comparativamente, la fermentación oxidativa es un proceso más eficiente, dado que produce más energía representada en moléculas de ATP.

Así mismo, las fermentaciones pueden clasificarse según los productos derivados del metabolismo en:

- a. **Fermentación no alcohólica:** es la fermentación realizada por levaduras, bacterias u hongos, como por ejemplo los productos de panadería o los vegetales fermentados.
- b. **Fermentación alcohólica:** el producto principal de esta fermentación es el alcohol; el proceso es llevado a cabo por diferentes microorganismos, pero más comúnmente por levaduras. A través de esta fermentación se obtiene generalmente cerveza, sidra, algunos destilados, entre otros.
- c. **Fermentación láctica:** es realizada principalmente por bacterias tales como los lactobacilos. El producto principal de la fermentación es el ácido láctico, el cual se usa en la producción de alimentos fermentados como yogur, kumis, queso, kéfir, entre otros.
- d. **Fermentación acética:** el producto principal de esta es el ácido láctico que se utiliza en la producción de vinagre. Generalmente es realizada por bacterias como las acetobacter.
- e. **Fermentación propiónica:** es realizada principalmente por bacterias como las propionibacterias; su producto principal es el ácido propiónico, utilizado en la producción de quesos madurados.

De acuerdo con el medio donde se desarrolla la fermentación, tecnológicamente se puede clasificar en fermentación líquida o sumergida y fermentación sólida (Tabla 6.1). La fermentación líquida se define como el proceso llevado a cabo por los

microorganismos en una solución homogénea de sustrato sólido y agua. En este sentido, el medio está constituido por dos fases: líquida y gaseosa. Este tipo de fermentación es el proceso más empleado en la industria, debido a la facilidad en el control de las variables. La fermentación sólida es el proceso llevado a cabo en un sustrato sólido en ausencia de agua libre, pero con la cantidad suficiente para que el microorganismo pueda llevar a cabo su metabolismo. La fermentación sólida es un sistema de tres fases: gaseosa, líquida y sólida. Cada una de las fermentaciones presenta ventajas y desventajas a nivel tecnológico, sin embargo, su elección dependerá del producto que se va a obtener, el microorganismo que se va a utilizar, y el medio de cultivo.

Tabla 6.1. *Ventajas y desventajas de la fermentación en estado sólido y de la fermentación sumergida*

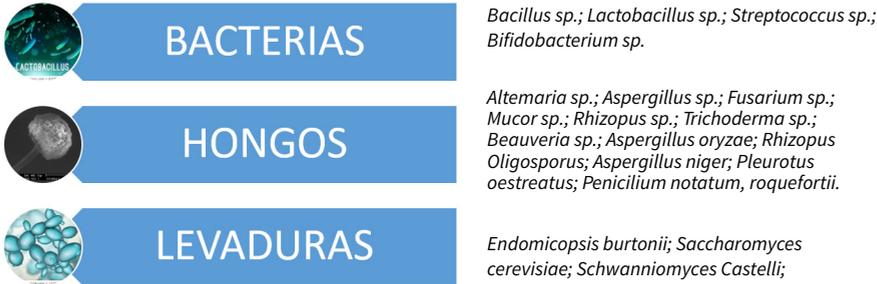
Fermentación en estado sólido	Fermentación sumergida
No hay agua libre	El agua es el principal componente del cultivo
El sistema de cultivo tiene tres fases (gas, líquido, sólido)	Fase líquida principalmente
Alta velocidad de producción y alto rendimiento	Baja velocidad de producción y bajo rendimiento
Mezcla difícil	Mezcla fácil
Heterogeneidad	Homogeneidad
Proceso de extracción simple y controlable	Extracción compleja
Biorreactores simples	Biorreactores complejos
Bajo costo de la materia prima	Alto costo de la materia prima

Fuente: adaptado de Chen (2013)

6.3.1. Tipos de microorganismos

Los procesos de fermentación generalmente son llevados a cabo por microorganismos tales como bacterias, hongos o levaduras (Figura 6.2), los cuales tienen diferentes características que afectan directamente el proceso tecnológico, por tanto, es importante reconocer cada uno de estos para realizar un control de la operación.

Figura 6.3. Ejemplos de microorganismos utilizados en la industria de alimentos



Fuente: elaboración propia.

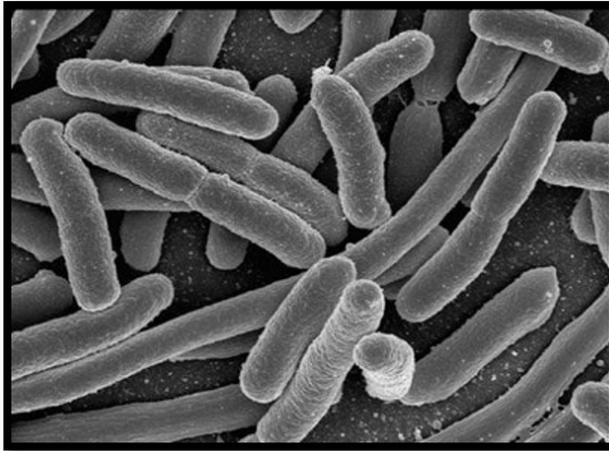
6.3.1.1. Bacterias

Las bacterias son microorganismos unicelulares con un tamaño que oscila entre 0,5 y 10 μm y pueden agruparse según su morfología en: esféricas (cocos), bastoncillo (bacilos) o curva. Su organización varía desde disposiciones solitarias hasta cadenas o tétradas, y su movilidad puede ser un atributo distintivo. Su principal método de reproducción es la división celular que se da mediante fisión binaria y algunos de estos microorganismos pueden desarrollar estructuras especializadas, como flagelos, cápsulas o endosporas.

Por la estructura de la pared celular, las bacterias se pueden clasificar como grampositivas o gramnegativas. Las bacterias gramnegativas tienen una pared celular compleja que incluye una membrana exterior compuesta por lipopolisacáridos, lipoproteínas y fosfolípidos y una membrana media. En contraste, las grampositivas exhiben una pared gruesa, compuesta por múltiples capas de peptidoglucano y ácidos teicoicos. Esta distinción es clave en la técnica de tinción de Gram que no solo influye en la coloración microscópica, sino que también proporciona información relevante sobre su comportamiento en sistemas de producción. La mayoría de los microorganismos patógenos son bacterias gramnegativas, mientras algunas de

las bacterias ácido-lácticas (BAL) son grampositivas. Las bacterias más comúnmente usadas en la biotecnología alimentaria son de los géneros: *Lactobacillus*, *Lactococcus* y *Streptococcus* (Figura 6.3).

Figura 6.4. Fotomicrografía del *Lactobacillus acidophilus* NCFM



Fuente: tomada de <https://url.unad.edu.co/5OuNp>

Conocer las características de las bacterias empleadas es esencial para diseñar estrategias de producción seguras y eficientes, destacando la importancia de elegir cepas bacterianas específicas, según las necesidades de la aplicación biotecnológica en alimentos. Así, la comprensión de la morfología y características distintivas de las bacterias contribuye de manera fundamental a optimizar los procesos y garantizar productos finales de alta calidad en la industria alimentaria.

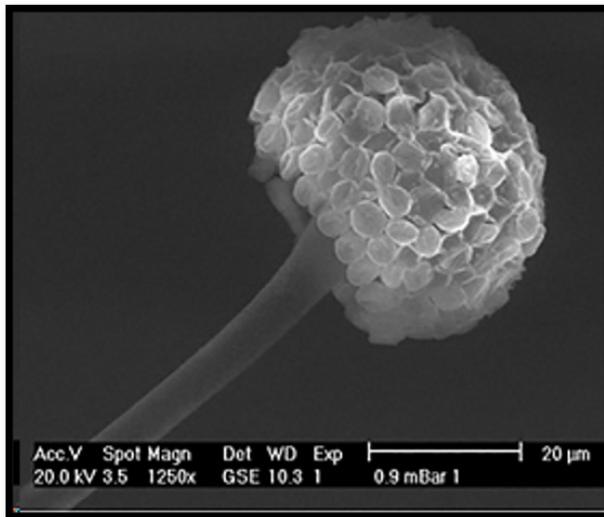
6.3.2.2. Hongos y levaduras

Tanto los hongos como las levaduras son microorganismos eucariotas que desempeñan roles fundamentales en la biotecnología alimentaria, debido a su capacidad para fermentar sustratos y producir compuestos útiles. El tamaño de las células varía entre 20 y 100 μm , tienen paredes celulares rígidas y membranas plasmáticas delgadas. El citoplasma es móvil y contiene organelos que están unidos a la membrana.

Los hongos (Figura 6.1) son microorganismos multicelulares no móviles caracterizados por estructuras ramificadas llamadas hifas. Su pared celular está compuesta

por celulosa, quitina o ambas. La compleja estructura de las hifas fúngicas proporciona resistencia y forma el micelio, base de su organización. La reproducción de hongos puede ser tanto asexual como sexual, con la formación de esporas que varían en forma, tamaño y color, siendo características cruciales para la taxonomía. Las hifas pueden ser o no tabicadas, o tabicadas uninuclear o multinuclear. Así mismo, las hifas pueden ser vegetativas o reproductivas, siendo estas últimas las que se extienden y forman esporas libres (conidias) o en saco (esporangio). Su papel en la biotecnología alimentaria se evidencia en la producción de enzimas valiosas, como las amilasas y proteasas, utilizadas en la industria alimentaria para la mejora de procesos y la generación de productos especializados (Tortora et al., 2007).

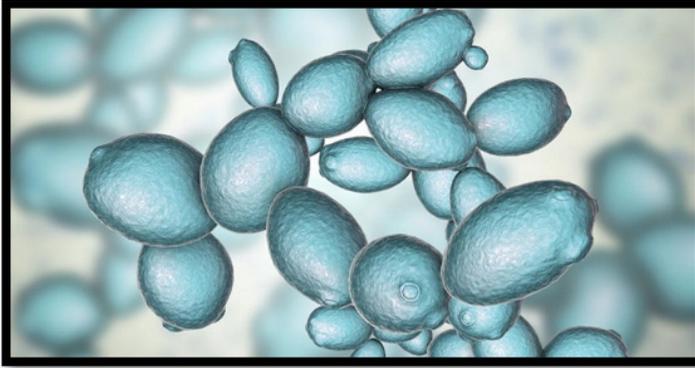
Figura 6.5. Fotomicrografía de *Rhizopus oryzae* (MUCL 28168)



Fuente: tomada de Londoño-Hernández et al. (2017).

Las levaduras son microorganismos unicelulares cuyas células pueden ser ovales, esféricas o alargadas, con un tamaño entre 2 y 10 μm (figura 6.6). Las levaduras son conocidas por su participación en procesos fermentativos, convirtiendo sustratos como azúcares en productos finales deseados como etanol y dióxido de carbono. Su reproducción, generalmente es por mitosis o asexual, lo cual facilita su adaptación a diversos ambientes y su aplicación en la producción de alimentos. Al igual que los hongos, no son móviles y su pared celular está compuesta de polisacáridos, proteínas y lípidos. Esta pared puede tener algunas cicatrices que indican los sitios de gemación pasada, y brindan información valiosa sobre su historial de crecimiento.

Figura 6.6. Fotomicrografía de *Saccharomyces cerevisiae*



Fuente: tomada de <https://url.unad.edu.co/7hPPJ>

En la biotecnología alimentaria, la versatilidad de las levaduras y hongos se aprovecha para fermentar sustratos, producir enzimas y desarrollar productos innovadores, subrayando su importancia como herramientas clave en la manipulación de procesos alimentarios.

6.3.2. Medios de cultivo

Durante la fermentación es importante establecer las condiciones de cultivo para lograr el máximo rendimiento, por tanto, es vital reconocer los requerimientos nutricionales del microorganismo. En este sentido, el medio de cultivo puede definirse como el sustrato de crecimiento del microorganismo, el cual tiene las concentraciones adecuadas de carbono, nitrógeno y minerales que le permiten llevar a cabo sus funciones metabólicas. En general, el carbono es requerido como fuente de energía de la célula y comúnmente se usa el almidón. Sin embargo, los microorganismos fotosintéticos y autotróficos pueden utilizar como fuente dióxido de carbono. Es importante determinar la vía por la cual los microorganismos heterótrofos metabolizan el carbono, así como cuánto de este es convertido en material celular. Se ha encontrado que, en fermentaciones anaeróbicas, los microorganismos incorporan alrededor del 10 % del carbono en el material celular, mientras que en fermentaciones aeróbicas se incorpora entre el 50 % y el 55 %. Con esta información es posible calcular los requerimientos de carbono del microorganismo para formular el medio de cultivo.

El nitrógeno es utilizado por el microorganismo en la formación de nuevas células o sus productos del metabolismo. En este caso es importante reconocer qué tipo de fuente es requerida por el microorganismo y su concentración. Algunos microorganismos pueden usar nitrógeno inorgánico para su crecimiento, por tanto, los medios de cultivo se pueden suplementar con amonio, sales de amonio o sus derivados. Sin embargo, ciertos microorganismos solo usan nitrógeno orgánico para su crecimiento, el cual puede ir desde aminoácidos simples hasta complejos, así como también purinas y vitaminas, entre otros. Las fuentes de nitrógeno para la suplementación de medios de cultivo suelen ser costosas, por lo cual se han investigado otras fuentes, tales como soya, pescado, malta, extracto de levadura, caseína, entre otros, que pueden ser más económicos. En general, el nitrógeno constituye el 10 % del peso seco de la mayoría de los microorganismos, por lo cual, el medio de cultivo debe ser suplementado según los rendimientos esperados; sin embargo, en cualquiera de los casos, dicha suplementación dependerá del microorganismo, el costo y el propósito de la fermentación.

Los medios de cultivo también deben suplementarse con minerales, los cuales son usados por los microorganismos para acelerar algunas de sus funciones metabólicas. Entre los elementos comúnmente requeridos por los microorganismos se encuentran fósforo, potasio, magnesio, sodio y calcio. Sin embargo, es importante reconocer las concentraciones requeridas por cada uno de los microorganismos para determinar los microelementos que deben usarse en los medios de cultivo.

El nitrógeno es utilizado por el microorganismo en la formación de nuevas células o sus productos del metabolismo. En este caso es importante reconocer qué tipo de fuente es requerida por el microorganismo y su concentración.

Algunos microorganismos pueden usar nitrógeno inorgánico para su crecimiento, por tanto, los medios de cultivo se pueden suplementar con amonio, sales de amonio o sus derivados.

6.3.3. Biorreactores

Los biorreactores pueden definirse como el espacio donde se lleva a cabo el proceso de fermentación y, por tanto, se brindan las condiciones para el crecimiento del microorganismo. El biorreactor debe tener algunos requerimientos básicos como: a) facilidad para el manejo del sustrato, b) prevención de la contaminación, c) mantenimiento de la temperatura para la fermentación, d) control del oxígeno en las fermentaciones aeróbicas o garantizar ausencia de oxígeno en las fermentaciones anaeróbicas, e) mantener homogeneidad en el sustrato, f) facilitar la extracción del producto final de la fermentación. En este sentido, para el diseño de un biorreactor deben tenerse en cuenta algunos criterios, dependiendo del tipo de producto, el microorganismo, el sustrato y el tipo de fermentación (Mitchell et al., 2006; Ruiz-Leza et al., 2007):

- a. El recipiente (tanque, bandejas, otros) debe mantener la asepsia durante todo el proceso de fermentación para evitar contaminación.
- b. El biorreactor debe proporcionar un sistema adecuado de aireación, agitación y homogenización para garantizar al microorganismo las condiciones para su crecimiento y metabolismo.
- c. El consumo de energía debe ser bajo.
- d. Debe permitir la entrada de nutrientes, control de pH, control de temperatura, control de oxígeno y control de humedad.
- e. Debido a que generalmente las reacciones de fermentación son procesos exotérmicos, el biorreactor debe facilitar los procesos de transferencia de calor y masa y mantener la temperatura deseada.
- f. Debe permitir mantener el sistema de cultivo puro, posterior a la esterilización y a la inoculación del microorganismo de interés.

En la industria, los biorreactores más desarrollados se encuentran para los procesos de fermentación líquida, mientras que para la fermentación sólida aún son incipientes, sin embargo, en los últimos años se ha avanzado en su desarrollo (Tabla 6.1 y Tabla 6.2).

Tabla 6.1. Tipos de biorreactores usados en fermentación sumergida

Tipo de biorreactor	Descripción
Tanque agitado	Los biorreactores de tanque agitado son los más empleados en procesos de fermentación sumergida, tanto a escala de laboratorio como a nivel industrial, ya que permiten controlar la mayoría de las variables del sistema. Estos biorreactores suelen contar con un impulsor que facilita la homogeneización del medio de cultivo y el suministro eficiente de oxígeno a las células microbianas. Su capacidad puede variar desde 15 mL hasta 2000 litros.
Balancín	Son sistemas de un solo uso, que generalmente incluyen una bolsa móvil y hacen un movimiento de balanceo para mantener la homogeneidad de la mezcla. El oxígeno se difunde por el espacio de cabeza a través de la interfaz líquido-gas, ya que estos biorreactores no están equipados con un rociador. El tamaño de estos equipos varía de unos pocos litros hasta máximo 100 litros, por lo cual solo se usan para producción a pequeña escala o para la preparación de preinóculos.
<i>Airlift</i>	Los biorreactores <i>airlift</i> se utilizan con menor frecuencia en la industria, dado que no se conocen muy bien los parámetros de funcionamiento en diferentes procesos de fermentación. Estos biorreactores constan de una columna aireada, lo cual permite la circulación de oxígeno en el medio. Los tipos de circulación de aire pueden ser por elevación de aire, tipo burbujeante o por chorro de aire. No hay un tubo guía del burbujeo en el biorreactor, por lo cual el control del flujo es complejo.
Lecho fijo	Los biorreactores de lecho fijo se utilizan generalmente para inmovilizar los microorganismos en un sustrato y llevar a cabo el proceso de fermentación. El medio de cultivo aireado pasa por el soporte, llevando a cabo la fermentación. El escalamiento del proceso en este tipo de biorreactor es complejo, así como la tecnología, por lo cual su uso en la industria es limitado.

Tabla 6.2. *Tipos de biorreactores usados en fermentación en estado sólido*

Tipo de biorreactor	Descripción
Bandeja	Es uno de los biorreactores más utilizados a nivel mundial para los procesos de fermentación en estado sólido. El equipo consta de bandejas perforadas dispuestas en una cámara con aireación forzada, lo cual permite la transferencia de oxígeno y masa en el sustrato, además de garantizar la humedad relativa del medio.
Columna	Desarrollado y patentado por el grupo del Instituto para la Investigación y Desarrollo (IRD, por sus iniciales en inglés), en Francia, entre 1975 y 1980, consta de columnas de 4 cm de diámetro por 20 cm de altura. En las columnas se dispone el material previamente inoculado y estas se colocan en un soporte de un baño de agua termorregulado. El equipo se conecta a aireación forzada para garantizar el paso de oxígeno. El equipo es sencillo y económico, sin embargo, para la toma de muestras durante la cinética se debe sacrificar el material completo de una de las columnas, por tanto, este equipo solo es conveniente durante las primeras etapas de desarrollo de un bioproceso, pues permite determinar los principales parámetros cinéticos.
Tambor horizontal	El tambor horizontal presenta diferentes diseños, de acuerdo con los requerimientos del sistema, se encuentra como un contenedor rotatorio, perforado o con paletas que permiten la agitación del sustrato. Algunos de estos consisten en un cilindro, con o sin chaqueta de enfriamiento, el cual gira lentamente. Presenta algunas dificultades como el mantenimiento de la temperatura, la humedad y, en muchos casos, produce ruptura del micelio lo cual disminuye la velocidad de reproducción para los hongos.

Tipo de biorreactor	Descripción
Zymotis	Diseñado y desarrollado por el antiguo grupo Orstom, consiste en platos verticales por donde internamente hay transferencia de calor y el aire es introducido por el fondo del sistema. Cada plato es cargado con el medio de cultivo previamente inoculado y se mantiene fijo durante el proceso. Durante la fermentación se presenta generalmente encogimiento del volumen del sustrato, limitando los procesos de transferencia de calor y masa y, por tanto, afectando los tiempos de fermentación.
Lecho fluidizado	Los biorreactores de lecho fluidizado permiten una operación en modo continuo durante tiempos prolongados. Estos biorreactores constan de un cilindro de vidrio con o sin chaqueta de enfriamiento. Para prevenir la compactación de la cama empacada se pueden usar soportes naturales o polímeros sintéticos, que presenten perforaciones de tal manera que hay una eficiente inmovilización de las células en el soporte con el medio de cultivo. El equipo provee agitación y aireación por flujo forzado, incrementando la transferencia de oxígeno en el sustrato.

Fuente: adaptado de Ruiz-Leza et al. (2007)

6.4. APLICACIONES DE LA BIOTECNOLOGÍA ALIMENTARIA

Son diversas las aplicaciones de la biotecnología en la industria alimentaria, entre ellas se destaca la producción de alimentos tales como los productos lácteos, cárnicos, cereales, bebidas, hongos comestibles y micoproteína; y la producción de ingredientes, materias primas y aditivos, como enzimas, péptidos, aromas, colorantes, entre otros.

6.4.1. Alimentos funcionales fermentados

Una de las principales aplicaciones de la biotecnología alimentaria es en el proceso de transformación de alimentos a través de la fermentación. Los alimentos fermentados han acompañado al hombre durante la historia, sin embargo, solo hasta



el conocimiento de las dinámicas microbiológicas y bioquímicas que ocurren en el alimento se ha logrado estandarizar el proceso de producción. Durante la fermentación, por efecto del metabolismo microbiano, se producen cambios en las características fisicoquímicas y sensoriales del alimento. Dichos cambios están relacionados directamente con los compuestos hidrolizados o sintetizados durante la fermentación. En este sentido, los cambios en la composición nutricional, por ejemplo, en productos fermentados con hongos filamentosos, se debe a la generación de micoproteína que incrementa el contenido de nitrógeno total; los cambios en la textura se deben a la transformación en la estructura de algunos carbohidratos y proteínas que usa el microorganismo para su metabolismo; los cambios en el color, sabor y aroma están relacionados con la producción de ácidos orgánicos, algunos ácidos grasos, entre otros. Así mismo, la producción de algunos compuestos como el ácido láctico u otros durante la fermentación favorece el incremento de la vida útil del alimento.

Los productos lácteos son los alimentos fermentados más comúnmente conocidos, pero la aplicación de este proceso sirve para elaborar una amplia gama de productos. Así mismo, hoy en día con el avance en las técnicas analíticas se ha logrado determinar que cerca del 90 % de los alimentos fermentados contienen compuestos bioactivos que tienen una actividad biológica determinada, por lo cual, muchos de estos alimentos son considerados funcionales. Los alimentos funcionales son aquellos que tienen una función, científicamente comprobada, más allá de la nutrición. Este beneficio o función se debe a los compuestos bioactivos presentes en el alimento, de manera natural o añadida, y tienen actividades biológicas como antioxidantes, antimicrobianos, antitumorales, entre otros, que pueden contribuir a la prevención de enfermedades, al fortalecimiento del sistema inmunológico, al mejoramiento de la función digestiva, entre otros. Por tanto, la elaboración de alimentos fermentados se ha constituido como una tecnología innovadora para obtener productos funcionales.

Productos lácteos fermentados

La fermentación de la leche surgió como un proceso para incrementar la vida útil de este producto, además que lograba cambiar de manera favorable su sabor y aroma. Hoy en día hay una gama de derivados lácteos fermentados que se producen en todo el mundo. Entre los productos lácteos fermentados se encuentran principalmente el yogur y el kéfir, entre otros. Durante la fermentación de la leche se logra disminuir la presencia de algunos compuestos como la lactosa, lo cual favorece la digestión, así mismo, la fermentación cambia la estructura de algunos compues-

tos y modifica la composición química. Para el desarrollo de alimentos lácteos fermentados se utiliza tanto leche bovina como leche de búfalas, cabras, ovejas, entre otras. En general, los productos lácteos fermentados se pueden clasificar en leches fermentadas, quesos y natas agrias. El proceso de fermentación es llevado a cabo principalmente por bacterias ácido-lácticas (BAL), sin embargo, en algunos estudios se ha encontrado la presencia de otros microorganismos como levaduras. Los géneros de microorganismos más comúnmente usados para la obtención de productos lácteos fermentados incluyen: *Lactobacillus*, *Lactococcus* y *Streptococcus*, y entre las especies se encuentran: *L. plantarum*, *L. fermentans*, *L. delbrueckii*, *L. casei*, *L. paracasei*, *L. rhamnosus*, *L. helveticus*, *L. bulgaricus*, y *L. acidophilus*. Entre otras de las bacterias que se han encontrado en los productos lácteos fermentados y que pueden influir directamente en las características fisicoquímicas y sensoriales de los productos obtenidos se encuentran: *Acetobacter*, *Leuconostoc*, *Acinetobacter* y *Pseudomonas*.

Vegetales fermentados

Al igual que los lácteos fermentados, la fermentación de vegetales se originó como una forma de conservar los productos cultivados durante los periodos de invierno o las temporadas de sequía (Hongu et al., 2017). En el mundo se ha desarrollado una variedad de productos fermentados, sin embargo, solo hasta hace algunos años se han reconocido sus propiedades, por lo que las investigaciones enfocadas en el proceso de fermentación de este tipo de productos han ido en aumento. Los vegetales fermentados se reconocen por su valor nutricional y sus características organolépticas, entre las que se destacan el sabor y la textura, por lo cual su consumo en el mundo ha incrementado en los últimos años. Uno de los productos destacados de los vegetales fermentados es el kimchi. El *kimchi* es un producto coreano elaborado con una variedad de verduras como col, pimiento rojo, ajo, jengibre, entre otros. El proceso de fermentación es llevado a cabo principalmente por BAL como *Leuconostoc*, *Lactobacillus*, *Weissella*, *Pediococcus* y *Lactococcus* (Song et al., 2021). Otro de los productos reconocidos es el *sauerkraut*, elaborado a partir de la fermentación de la col con BAL (*Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus brevis* y *Lactobacillus sakei*), microorganismos reconocidos por sus beneficios a la salud asociados con el control de patógenos, y la generación de compuestos bioactivos que favorecen el sistema digestivo (Garnås, 2023). En general, los vegetales fermentados pueden considerarse como una fuente potencial de microorganismos probióticos, cuyo consumo puede ayudar a la mejora de la salud.

Cereales y legumbres

Los cereales y las legumbres se caracterizan por su alto valor nutricional en términos de carbohidratos y proteínas, respectivamente. Sin embargo, en muchas ocasiones, también se caracterizan por su alto contenido de compuestos antinutricionales, lo cual limita la asimilación de los macronutrientes. En este sentido, la fermentación juega un papel crucial para el mejoramiento de las características nutricionales y organolépticas de cereales y legumbres, incrementando la biodisponibilidad de los macro y micronutrientes, además, permitiendo la liberación de compuestos bioactivos que contribuyen a la salud del consumidor. Entre este grupo de alimentos, los más reconocidos son el tempeh, el miso y el natto. El tempeh es producto de la fermentación de soya con hongos filamentosos, generalmente *Rhizopus oligosporus* o *Rhizopus oryzae*. Durante la fermentación se incrementa la proteína disponible, además de reducir los compuestos antinutricionales, logrando la mejorada en la biodigestibilidad proteica de la soya. Algunas investigaciones han demostrado que la fermentación de la soya con *Lactobacillus plantarum* reduce la concentración de los factores antinutricionales presentes, como los fitatos, inhibidores de tripsina y oligosacáridos, mejorando la calidad nutricional de esta legumbre (Adeyemo y Onilude, 2013). En la región Andina, la quinua es uno de los pseudocereales más reconocidos por sus beneficios nutricionales; no obstante, al igual que otras leguminosas y cereales, contiene una elevada concentración de compuestos antinutricionales que pueden limitar su consumo. Se ha demostrado que la fermentación de la quinua con BAL es un proceso que ayuda a mejorar el potencial nutricional y biológico de este pseudocereal y además que puede ser un ingrediente utilizado para elaborar alimentos funcionales (Abdelshafy et al., 2024). En este sentido, la fermentación de cereales y pseudocereales es un proceso de interés para la industria de alimentos.

Cárnicos y pescados fermentados

La fermentación de carnes y pescados se da como una alternativa al uso de otras tecnologías de procesamiento, tales como salación o congelación, permitiendo el incremento de la vida útil de estos productos perecederos. A través de fermentación se pueden obtener salsas, pastas, embutidos, entre otros. En Corea se elabora una gran variedad de productos de pescado fermentados, entre los cuales se encuentra el *jeotgal*, elaborado con una variedad de pescados y mariscos con microorganismos como *Lactobacillus*, *Leuconostoc* y *Halobacterium*. El *jeotgal* se reconoce por su contenido de aminoácidos esenciales, y los compuestos con actividad biológica como antioxidante y antimutagénico, convirtiéndolo en un producto funcional

(Koo et al., 2016). Cada uno de los productos cárnicos fermentados es obtenido por diferentes procesos, dependiendo de la materia prima, sin embargo, en general se utilizan las BAL como microorganismos para el proceso dado a los beneficios de las bacteriocinas producidas durante la fermentación, así como a los compuestos bioactivos liberados cuyas actividades biológicas han sido demostradas, siendo un potencial para la producción de alimentos funcionales a partir de cárnicos o pescados.

Bebidas

Una de las aplicaciones más reconocidas a nivel mundial del proceso de fermentación se encuentra en la elaboración de bebidas, tanto alcohólicas como no alcohólicas (bebidas lácteas, jugos, otros). En particular, el proceso de las bebidas alcohólicas es uno de los más antiguos. Su historia data del Neolítico, donde algunos hallazgos sugieren que se hacían jarras para beber. Cada uno de los países cuenta con bebidas autóctonas producidas por fermentación natural que se han utilizado a lo largo de los años en diferentes actividades culturales y religiosas, por lo que su consumo es muy común (Tomar et al., 2023). Sin embargo, algunos productos, como la cerveza o el vino, se han logrado estandarizar, produciéndose a partir de la fermentación controlada con *Saccharomyces cerevisiae*. Algunos estudios han demostrado que la fermentación de las uvas permite la liberación de compuestos antioxidantes y compuestos asociados a la prevención de enfermedades cardiovasculares, por lo cual su consumo moderado es aconsejable.

6.4.2. Péptidos bioactivos

Los péptidos bioactivos son fragmentos de la cadena proteica compuestos de 2 a 20 residuos de aminoácidos, tienen un peso molecular de menos de 6000 Da, son obtenidos durante la proteólisis, presentan propiedades biológicas como antioxidantes, antimicrobianas, antihipertensivas, entre otros, por lo cual son considerados como compuestos terapéuticos que pueden usarse en la prevención y tratamiento de ciertas enfermedades, debido a su alta especificidad, espectro de acción y baja toxicidad (Cruz-Casas et al., 2021; Xiang et al., 2019). Las fuentes para la obtención de péptidos bioactivos por fermentación pueden ser vegetal: soya, proteína de sésamo, quinua, frijol; o animal: lácteos y derivados, huevos, pescados, mariscos, subproductos cárnicos, entre otros. Los péptidos bioactivos pueden ser obtenidos por procesos de fermentación o por hidrólisis enzimática. La fermentación es una de las metodologías más económicas para la obtención de estos compuestos, y se han usado algunos microorganismos, como *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefa-*

ciens, *Streptococcus spp.*, *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus plantarum*, *Pediococcus acidilactici*, *Enterococcus gallinarum*, *Aspergillus oryzae*, entre otros (Colombo et al., 2023; López-Pedrouso et al., 2023; Tadesse y Emire, 2020). Pese a las propiedades biológicas que tienen los péptidos bioactivos se conoce poco acerca de los mecanismos de acción de estos, por lo cual esta área de conocimiento es de gran interés para el desarrollo de alimentos funcionales y productos nutraceuticos.

6.4.3. Enzimas

Las enzimas son catalizadores biológicos que aceleran las reacciones químicas, siendo más eficientes, específicas y menos costosas que los catalizadores químicos. Debido a sus aplicaciones industriales, el mercado de las enzimas ha incrementado en los últimos años, por lo cual las investigaciones acerca de los procesos de obtención para lograr disminuir los costos y mejorar las características de estas también han ido en aumento. Las enzimas son biomoléculas vitales para mantener las funciones de cualquier organismo; de acuerdo con el proceso realizado se pueden clasificar en seis grupos con sus respectivos códigos: 1 = oxidorreductasas, 2 = transferasas, 3 = hidrolasas, 4 = liasas, 5 = isomerasas, y 6 = ligases (Londoño-Hernández et al., 2020; Zhang et al., 2018).

Desde una perspectiva industrial, las enzimas se pueden producir mediante dos métodos principales: la fermentación en estado sólido (FES) y la fermentación sumergida (FS). La elección del proceso depende de factores como el tipo de fuente o material de fermentación, el microorganismo utilizado y la enzima específica que se desea producir. Aunque la FS es uno de los métodos más comúnmente empleados, dada la estandarización de los biorreactores para el control del proceso, la FES ha ganado relevancia entre los investigadores, debido a sus ventajas, como la valorización de residuos agroindustriales para la obtención de una variedad de enzimas.

6.5. NUEVAS TENDENCIAS DE LA BIOTECNOLOGÍA ALIMENTARIA

Gracias a los avances en ingeniería genética y a las investigaciones en torno a la manipulación genética de microorganismos para mejorar los parámetros cinéticos o la producción específica de metabolitos, se ha logrado una evolución significativa de la biotecnología alimentaria. Así mismo, se ha progresado en el desarrollo de tecnologías que permiten la identificación de los microorganismos que participan en un proceso, así como la cuantificación rápida de los análisis microbiológicos en la industria, logrando mantener estándares de calidad. Entre las técnicas de mayor

relevancia se destacan la reacción en cadena de la polimerasa (PCR por sus iniciales en inglés) y la tecnología CRISPR-Cas9.

La técnica PCR es esencial en biología molecular y ha permitido la detección y análisis de material genético. En biotecnología alimentaria se utiliza para la identificación y caracterización de microorganismos, tanto patógenos como microorganismos benéficos que participan en los procesos de fermentación para la obtención de alimentos. La identificación de estos microorganismos permite proponer mejoras en los procesos, usar nuevas cepas, garantizar las características fisicoquímicas de los alimentos fermentados, así como controlar las variables para la obtención de dichos alimentos (El Sheikha y Hu, 2020). Así mismo, hoy en día, con la PCR se permite la identificación rápida de contaminantes, lo cual garantiza la seguridad alimentaria y facilita el control de calidad en la industria de alimentos.

La tecnología CRISPR-Cas9, conocida comúnmente como “las tijeras genéticas”, es una herramienta que permite la edición genética de manera precisa. En biotecnología alimentaria es usada para la modificación de genes específicos de los microorganismos utilizados para los procesos de fermentación, con el objetivo de incrementar los rendimientos en la obtención de metabolitos de interés industrial. Utilizando la herramienta de edición del genoma CRISPR-Cas9 es posible obtener cepas para fermentación de alimentos más versátiles, reduciendo los tiempos de proceso. Esta herramienta se ha utilizado para la modificación de los genes de levaduras como por ejemplo *S. cerevisiae*, encontrando que en procesos de elaboración de vinos las cepas modificadas se adaptan mejor a medios de cultivos con alta concentración de nitrógeno, entre otros beneficios (Chai et al., 2022). Esta herramienta no es costosa, por lo cual su uso supone una revolución en la industria de alimentos, al lograr optimizar los procesos de producción y mejorar la eficiencia en la obtención de alimentos fermentados e ingredientes funcionales.

La manipulación genética no solo se ha dado en las cepas utilizadas para la fermentación de alimentos, también ha dado paso para la mejora genética de plantas, incorporando nuevos genes con rasgos deseables como la resistencia a la sequía, resistencia a plagas y enfermedades, mejora de las características nutricionales, entre otras, lo cual mejora el rendimiento. La producción de alimentos genéticamente modificados, también conocidos como organismos modificados genéticamente (OMG), puede contribuir al logro de los objetivos sostenibles, principalmente con la disminución del hambre y los procesos sostenibles, sin embargo, su inclusión en el mercado ha planteado un reto. Actualmente, algunos alimentos genéticamente modificados como el maíz y la soya hacen parte de la cadena alimenticia, pero, al-

gunas preocupaciones éticas y de bioseguridad han llevado a una evaluación del riesgo asociado a su consumo. Es por esto que la transparencia en la etiqueta y la comunicación efectiva con los consumidores y el establecimiento de una normatividad clara son aspectos fundamentales para abordar las preocupaciones y garantizar la aceptación pública de dichos alimentos o subproductos elaborados con estas materias primas (Ghimire et al., 2023).

La manipulación genética no solo se ha dado en las cepas utilizadas para la fermentación de alimentos, también ha dado paso para la mejora genética de plantas, incorporando nuevos genes con rasgos deseables como la resistencia a la sequía, resistencia a plagas y enfermedades, mejora de las características nutricionales, entre otras, lo cual mejora el rendimiento.

IMPORTANCIA DEL DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS EN INGENIERÍA DE ALIMENTOS

JOHANNES DELGADO OSPINA

INTRODUCCIÓN

La investigación científica es un proceso dinámico, sistemático y ordenado de indagación en el que se aplican métodos rigurosos para adquirir nuevo conocimiento, desarrollar teorías o buscar soluciones a fenómenos específicos (Gutiérrez y De la Vara, 2013). El proceso debe ser riguroso y tener argumentos legítimos explicados a través de procesos deductivos para incluir premisas verdaderas y alcanzar una conclusión lógica. Al ser un proceso sistemático, cuenta con una serie de pasos que aseguran la idoneidad de los resultados y permiten que el estudio sea reproducible por otros investigadores o personas interesadas.

Los ingenieros de alimentos, ingenieros agroindustriales o afines utilizan diferentes metodologías de investigación para el desarrollo de nuevos productos: la reingeniería, evaluar el efecto de reemplazar un ingrediente de la formulación, el mejoramiento de sus procesos y la aplicación de tecnologías emergen-

tes, entre otras. Esto les permite estar a la vanguardia en la producción y brindarle al consumidor la mejor experiencia de usuario.

En general, para que una investigación sea exitosa es fundamental seguir con atención una serie de sencillos pasos, que permitirán tener un análisis estadístico sólido que soporte las conclusiones a las que se llega al final del experimento.

En primer lugar, se inicia con la observación del fenómeno que se quiere explicar o investigar, es la base para poder desarrollar el estudio. Continúa con la formulación de la pregunta a la que se le busca respuesta, es decir, se debe identificar de manera precisa qué es lo que se quiere saber sobre el fenómeno observado. Luego se construye una hipótesis, que es la suposición formal con respecto a la observación realizada. La hipótesis trata de explicar o responder la pregunta mediante una suposición que se pueda probar, esto se constituye entonces en una teoría.

A continuación, se debe definir el diseño experimental que permita analizar adecuadamente la relación entre variables y hacer que ese análisis sea lo más objetivo posible.

Un diseño experimental adecuado permite probar las relaciones existentes entre las variables. La variable independiente es aquella que el investigador controla o modifica para medir su efecto sobre las variables de respuesta o también llamadas variables dependientes. El control o testigo también es una parte muy importante en un diseño experimental; en los experimentos, permite al investigador medir la respuesta de la variable dependiente sin el efecto de la variable independiente, es decir, controla cómo se introduce esa intervención en el entorno de la experimentación. Un diseño experimental aplicado de manera correcta puede establecer una relación causal entre la variable independiente y las variables dependientes.

Una vez establecido el diseño experimental, se deben definir y aplicar las metodologías (fase experimental) que están al alcance de los investigadores y que sirven para medir los atributos buscados en las variables de respuesta. Las metodologías usadas pueden ser cuantitativas, cuando se pueden obtener datos que son medibles o cuantificables; cualitativas, cuando se enfocan en obtener información de experiencias y percepciones, y mixtas, cuando combinan tanto las metodologías cualitativas como las cuantitativas.

El experimento tiene como finalidad probar la veracidad de la predicción y de este se obtienen datos cualitativos o cuantitativos que deberán ser analizados de acuer-

do con el diseño experimental escogido con ayuda de herramientas estadísticas o *software* de análisis estadístico que permiten validar las relaciones existentes entre las variables estudiadas.

Finalmente, se discuten los resultados obtenidos en el experimento, teniendo en cuenta el diseño experimental y el análisis estadístico, y se emiten las conclusiones pertinentes. Cuando mediante los resultados del experimento no se encuentra una respuesta que satisfaga la hipótesis, los científicos pueden crear un nuevo proceso basándose en estos resultados.

La mayoría de las oportunidades de mejora o problemas que se presentan en la industria están condicionados por el tiempo y el presupuesto, lo que supone una limitación importante a la hora de experimentar. Por lo que para tener un experimento sólido que permita disminuir el error y tener el número adecuado de unidades experimentales ahorrando tiempo y recursos, todas las industrias o empresas deberían buscar la forma de obtener de los experimentos la mayor información posible y de la manera más eficiente.

Esto solo es posible con el uso de un diseño experimental adecuado, por esto, este capítulo tiene como objetivo presentar una breve descripción teórica del proceso de planificación del diseño de los experimentos y mostrar algunos de los modelos estadísticos que pueden emplear los ingenieros de alimentos, ingenieros agroindustriales o profesiones afines en el diseño de sus experimentos.

7.1. Elementos de un diseño experimental

Unidad experimental: también conocida como unidad de muestreo o unidad de observación, es la principal unidad de interés que es objeto del experimento y a la que se aplica de manera directa uno o varios tratamientos.

Factores: son también llamadas variables independientes, que se modifican durante la experimentación para observar cómo afectan a las variables de respuesta o variables dependientes.

Niveles: son los distintos estados o valores que asumen los factores, es decir, son las variaciones o modificaciones que se realizan para aplicar los factores.

Tratamientos: es la combinación de niveles evaluados para un conjunto de factores.

Controles o testigos: es el punto de referencia con el que se compara el efecto de aplicar los tratamientos. En la mayoría de los experimentos, el control se basa en medir las variables de respuesta a las unidades experimentales a las que no se les aplican los tratamientos (control absoluto). Pero pueden existir otros controles a los que sí se les aplica un tratamiento diferente, cuyos resultados son conocidos o simplemente se desean confrontar (control relativo).

Repeticiones: es el número de unidades experimentales a las que se les aplica un mismo tratamiento. Durante toda experimentación se deben repetir los experimentos para disminuir la probabilidad de que se presente el error.

Tipos de experimentos: los tipos de experimentos dependen del número de factores que se analizan en el experimento. Se denomina experimento simple, cuando se analiza un solo factor el número de tratamientos corresponde también al número de niveles del factor. Mientras que se denomina experimento factorial cuando se analizan dos o más factores; en este caso, el número de tratamientos que se van a ensayar surge de la combinación de los niveles de los factores estudiados.

Error experimental: es la diferencia entre el valor observado de la variable respuesta sobre una unidad experimental y su valor esperado (de acuerdo con el modelo estadístico empleado). Es el responsable de la variación que se observa entre las unidades experimentales sometidas al mismo tratamiento.

El error experimental puede estar compuesto por tres fuentes: el error de medición, es la variación en la respuesta que introduce el instrumento o el procedimiento de medición; el error de muestreo, es la variación debida a la heterogeneidad de las unidades experimentales; y el error de tratamiento, es la variación debida a los errores en la reproducción del tratamiento.

7.2. Diseño completamente al azar (DCA) o análisis de varianza (Anova) de un factor

Es el más simple de los diseños de experimentos que comparan tres o más tratamientos, puesto que considera que los tratamientos y el error aleatorio son las dos únicas fuentes de variabilidad. En este caso se utiliza Anova para comprobar si existen diferencias en las medias. El Anova de un factor se utiliza cuando se tiene un solo factor o variable independiente y el objetivo es investigar si las variaciones o los diferentes niveles de ese factor tienen un efecto medible sobre la variable depen-

diente. Se utiliza cuando la variable dependiente se distribuye de manera normal en cada uno de los grupos y la variabilidad dentro de cada grupo es similar en todos los grupos. En este diseño se comparan las medias de tres o más grupos y puede indicar si al menos un par de medias es significativamente diferente, pero no puede indicar cuál de ellas, por lo que requiere una prueba de comparación de medias.

En este método se prueba la hipótesis nula (H_0), es decir, que no hay diferencias entre las medias poblacionales, las medias son iguales. Contrastada con la hipótesis alternativa (H_a) que implica que al menos una de las medias es diferente.

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_i$$

H_a = al menos una de las medias es diferente

μ_i es la media del i-ésimo nivel del factor.

Se explica mejor el Anova de un factor mediante el siguiente ejemplo.

Ejemplo

Una empresa de alimentos que produce carne para hamburguesa empacada al vacío quiere innovar en su formulación al añadir un ingrediente adicional que permite que la carne pierda menos volumen al ser llevada a cocción. Deciden diseñar un experimento para evaluar si el producto funciona como lo indica el proveedor.

La pregunta de investigación puede ser formulada así: ¿El nuevo ingrediente cumple la función que indica el proveedor?

El Anova de un factor se utiliza cuando se tiene un solo factor o variable independiente y el objetivo es investigar si las variaciones o los diferentes niveles de ese factor tienen un efecto medible sobre la variable dependiente. Se utiliza cuando la variable dependiente se distribuye de manera normal en cada uno de los grupos y la variabilidad dentro de cada grupo es similar en todos los grupos.

Mientras que la hipótesis nula es: el nuevo ingrediente no modifica la pérdida del volumen cuando la carne de la hamburguesa es sometida a cocción, la hipótesis alterna será: el nuevo ingrediente modifica la pérdida del volumen cuando la carne de la hamburguesa es sometida a cocción.

En este DCA, el factor es la concentración del nuevo ingrediente con tres niveles (0,5 %, 1,0 % y 1,5 %) que se encuentran dentro del rango de aplicación sugerido por el proveedor del ingrediente y un control absoluto. La variable de respuesta será el porcentaje de pérdida de volumen de la carne de hamburguesa después de la cocción. Para tener una menor probabilidad de error deciden usar cinco repeticiones en cada uno de los tratamientos.

El número de unidades experimentales se obtiene después de multiplicar el número de factores por los tratamientos incluido el control y las repeticiones, es decir: Unidades experimentales = 1 factor x (3 tratamientos + 1 control) x 5 repeticiones = 20.

Conociendo esto, inician con la experimentación, teniendo en cuenta llevar a cabo la aplicación de los tratamientos a muestras obtenidas de manera aleatoria y obtienen los resultados tabulados en la tabla 7.1.

Tabla 7.1. *Pérdida de volumen de la carne de hamburguesa después de cocción para cada uno de los tratamientos aplicados*

Concentración nuevo ingrediente (% p/p)	Pérdida de volumen después de cocción (%)				
Control	21,4	20,5	20,1	19,4	19,6
0,5	15,4	16,9	14,5	16,2	14,9
1,0	13,6	12,7	11,8	12,7	11,0
1,5	13,7	14,8	13,6	13,1	14,3

Fuente: elaboración propia.



Los investigadores realizan el Anova a un nivel de significancia alfa 0,05, obteniendo los resultados consignados en la tabla 7.2.

Tabla 7.2. Resultados Anova a un nivel de significancia alfa 0,05 para los datos de la tabla 7.1. Diseño completamente al azar.

Resumen				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Control	5	101	20,2	0,635
0,5	5	77,9	15,58	0,947
1	5	61,8	12,36	0,983
1,5	5	69,5	13,9	0,435

Análisis de varianza						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tratamientos	172,578	3	57,526	76,701333	1,03426E-9	3,238871
Error aleatorio	12,0	16	0,75			
Total	184,578	19				

Fuente: elaboración propia.



Como el valor de F calculado (76,70) es mayor que F crítico (3,23) se puede concluir que F es significativo y se descarta la hipótesis nula, por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna que dice que el nuevo ingrediente modifica la pérdida del volumen cuando la carne de la hamburguesa es sometida a cocción, es decir, no todos los tratamientos son iguales. Adicionalmente, como el valor de la probabilidad ($1,03426E-9$) es menor al valor de la significación que se ha elegido (0,05), se descarta la hipótesis nula.

El siguiente paso se hace para conocer cuáles de los tratamientos son diferentes entre sí, para esto se pueden realizar diferentes test de comparaciones múltiples como el test HSD (*Honestly-Significant-Difference*) de Tukey (tabla 7.3), que permite comparar las medias de los niveles de un factor.

Tabla 7.3. Resultados del test HSD de Tukey para los datos de la Tabla 7.1. Diseño completamente al azar

Comparaciones	Nivel de significancia
Control vs. 0,5 %	$P < 0,01$
Control vs. 1,0 %	$P < 0,01$
Control vs. 1,5 %	$P < 0,01$
0,5 % vs. 1,0 %	$P < 0,01$
0,5 % vs. 1,5 %	$P < 0,05$
1,0 % vs. 1,5 %	No significativo

Fuente: elaboración propia.

El test HSD de Tukey les muestra a los investigadores que solo los tratamientos que incorporan el nuevo ingrediente en concentraciones de 1,0 % y 1,5 % son estadísticamente iguales. Mientras que los demás son estadísticamente diferentes.



Los investigadores concluyen de acuerdo con la pregunta de investigación que la incorporación del nuevo ingrediente en cualquiera de las concentraciones evaluadas sí cumple la función indicada por el proveedor y logra disminuir el porcentaje de pérdida de volumen de la hamburguesa después de la cocción. La forma como se expresan los resultados finales se puede observar en la tabla 7.4.

Tabla 7.4. Resultado estadístico de la pérdida de volumen de la carne de hamburguesa después de cocción para cada uno de los tratamientos aplicados

Concentración nuevo ingrediente (% p/p)	Pérdida de volumen después de cocción (%)
Control	20,2 ± 0,8 a
0,5	15,6 ± 1,0 b
1,0	12,4 ± 1,0 c
1,5	13,9 ± 0,7 c

Resultados expresados como media ± desviación estándar, letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre los tratamientos.

Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, al terminar esta primera comprobación usando un modelo estadístico muy sencillo, los investigadores pueden iniciar otras pruebas que midan los cambios químicos, físicos, fisicoquímicos, sensoriales o tiempo de vida útil, entre otros, que implica la adición del ingrediente y tomar otras decisiones como la concentración a usar en el producto final.

7.3. DISEÑO CON ENFOQUE DE UN FACTOR A LA VEZ

En este enfoque, todas las variables se establecen en un nivel constante y el efecto de cada variable se investiga cambiando las variables individuales una a la vez. Si bien esto puede parecer un enfoque ordenado, en realidad es muy ineficiente y puede producir resultados inexactos, ya que los efectos de cambiar un solo factor a la vez pueden ser muy diferentes de cambiar múltiples efectos juntos. Además, la



estimación del efecto de las variables individuales se basa en el supuesto de que las interacciones entre variables no son importantes.

Los sistemas alimentarios son de naturaleza multivariada, siendo las características sensoriales individuales y el gusto un efecto combinatorio de múltiples cualidades físicas y químicas. Por ejemplo, en la evaluación hedónica de un producto de bebida cítrica, el gusto del consumidor puede depender de diversas cualidades de sabor (dulzura, acidez) y olor (afrutado, cítrico), además de otras propiedades físicas (presencia de sedimentos sólidos, color).

7.4. DISEÑO DE BLOQUES COMPLETOS AL AZAR (BCA)

Se usa cuando se conoce que las unidades experimentales no son iguales u homogéneas en alguna de las variables identificadas como de impacto importante sobre la respuesta o porque las condiciones físicas o del entorno en que se lleva a cabo el experimento no son totalmente uniformes. Esto asegura comparaciones más justas entre los tratamientos. El diseño en bloques surge como respuesta a la necesidad que tiene el investigador de ejercer un control adecuado de la variación.

Tres fuentes de variabilidad son las que se consideran en este tipo de diseño de experimentos: el factor de tratamientos, el factor de bloques y el error aleatorio. Para desarrollar este método estadístico, las unidades experimentales se agrupan de manera homogénea en bloques para realizar la comparación de los tratamientos en un medio más homogéneo, el cual le permite eliminar de manera sistemática el factor perturbador que pueda existir.

En un diseño en bloques completos al azar, cada bloque generado debe contener todos los tratamientos, es decir, el número de tratamientos debe ser igual al número de unidades experimentales, por lo que los bloques en este diseño constituyen las repeticiones del experimento. Se debe tener en cuenta que la aleatorización se hace dentro de cada bloque.

El uso de bloques estratifica las unidades experimentales en grupos homogéneos o unidades más parecidas. En la industria de alimentos, los factores de bloqueo que pueden aparecer en la práctica son: turno, diferencias de temperatura durante el día o la noche, el lote, materias primas, operarios, tipo de material, línea de producción, máquina, método, etcétera.

En este método se prueban dos hipótesis nulas (H_0), es decir, que no hay diferencias entre las medias poblacionales de los tratamientos y no hay diferencias entre las medias poblacionales dentro de los bloques. Contrastada con las hipótesis alternativas (H_a) que implica que al menos una de las medias es diferente.

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_i \qquad H_a = \text{no todas las } \mu_i \text{ son iguales}$$

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_i \qquad H_a = \text{no todas las } \tau_i \text{ son iguales}$$

Ejemplo

El ingeniero a cargo del departamento de producción de una empresa de alimentos que produce jamones, con frecuencia encuentra un defecto en la forma de los jamones que impide un corte uniforme y como consecuencia de esto se genera mucho producto no conforme. El ingeniero sospecha que la presión con la que se prensa la carne puede causar estos defectos, por lo que decide diseñar un experimento para investigar su hipótesis. Sin embargo, el ingeniero también cree que el agente de compactación que le surte un proveedor puede tener alguna relación con el problema, ya que el producto lo surte por lotes muy pequeños, aunque de acuerdo con las especificaciones de la oficina de compras, todos los lotes cumplen con las especificaciones de producto.

Por lo tanto, el ingeniero decide investigar el efecto de cuatro niveles diferentes de presión del prensado en los jamones, utilizando un diseño de bloques completos aleatorios, considerando los lotes del agente de compactación como bloques.

El diseño de bloques completos al azar se muestra en la tabla 7.5. Se debe tener en cuenta que existen cuatro niveles de presión (tratamientos) y seis lotes de agente de compactación (bloques). Es importante recordar que el orden en el que se prueban los niveles de presión dentro de cada bloque es aleatorio. La variable de respuesta es el rendimiento o el porcentaje de jamones en la producción que no contenían defectos.



Tabla 7.5. *Porcentaje de jamones sin defectos para cuatro diferentes presiones de compactación, categorizados por lotes del agente de compactación de acuerdo con el diseño en bloques completos al azar*

Tratamientos	Lote de agente de compactación (bloques)					
Presión (PSI)	1	2	3	4	5	6
8500	90,3	89,2	98,2	93,9	87,4	97,9
8700	92,5	89,5	90,6	94,7	87,0	95,8
8900	85,5	90,8	89,6	86,2	88,0	93,4
9100	82,5	89,5	85,6	87,4	78,9	90,7

Fuente: elaboración propia.

Los investigadores realizan el Anova a un nivel de significancia alfa 0,05, obteniendo los resultados consignados en la tabla 7.6.

El uso de bloques estratifica las unidades experimentales en grupos homogéneos o unidades más parecidas. En la industria de alimentos, los factores de bloqueo que pueden aparecer en la práctica son: turno, diferencias de temperatura durante el día o la noche, el lote, materias primas, operarios, tipo de material, línea de producción, máquina, método, etcétera.

Tabla 7.6. Resultados Anova a un nivel de significancia alfa 0,05 para los datos de la tabla 7.5. Diseño de bloques completos al azar (BCA).

Resumen				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
8500	6	556,9	92,817	20,950
8700	6	550,1	91,683	10,918
8900	6	533,6	88,932	8,964
9100	6	514,6	85,767	19,759
1	4	350,8	87,700	20,560
2	4	359,0	89,750	0,510
3	4	364,0	91,000	27,707
4	4	362,2	90,550	19,097
5	4	341,3	85,325	18,516
6	4	377,9	94,473	9,569

Análisis de varianza						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tratamientos	178,01401	3	59,338004	8,10181	0,001922	3,28738
Bloques	193,09152	5	38,618304	5,27281	0,005423	2,90129
Error	109,86056	15	7,324038			
Total	480,96609	23				

Fuente: elaboración propia.



En el caso de los tratamientos, el valor de F calculado (8,10181) es mayor que F crítico (3,28738) se concluye que F es significativo y se rechaza la hipótesis nula, es decir, se acepta la hipótesis alterna que dice que la presión afecta el rendimiento o el porcentaje de jamones sin defectos, es decir, no todos los tratamientos son iguales.

En el caso de los lotes de agente de compactación (bloques), se encontró que el valor de F calculado (5,27281) es mayor que F crítico (2,90129), por lo tanto, se rechaza la segunda hipótesis nula, es decir, se acepta la hipótesis alterna, los lotes de agente de compactación tienen relación con el porcentaje de jamones sin defectos.

Para determinar cuáles tratamientos son diferentes se usó el test LSD (*Least Significant Difference*) de Fisher, que permite comparar las medias de los tratamientos y de los bloques (tabla 7.7).

Tabla 7.7. Resultados del test LSD Fisher para los datos de la tabla 7.5. Diseño de bloques completos al azar (BCA)

Comparaciones	Nivel de significancia
8500 vs. 8700	No significativo
8500 vs. 8900	No significativo
8500 vs. 9100	$P < 0,01$
8700 vs. 8900	No significativo
8700 vs. 9100	$P < 0,01$
8900 vs. 9100	No significativo

Fuente: elaboración propia.

El test LSD de Fisher le muestra al ingeniero que los tratamientos que aplican menor presión de 8500 y 8700 PSI, son estadísticamente iguales, y tienen el mayor porcentaje de jamones sin defectos. También muestra que el tratamiento que aplica la presión más alta (9100 PSI) es el que menor porcentaje de jamones sin defectos presenta (tabla 7.8).



Tabla 7.8. Resultado estadístico del porcentaje de jamones sin defectos para cada uno de los tratamientos aplicados

Presión (PSI)	Porcentaje de jamones sin defectos (%)
8500	92,8 ± 4,6 a
8700	91,7 ± 3,3 a
8900	88,9 ± 3,0 ab
9100	85,8 ± 4,4 b

Fuente: elaboración propia.

Resultados expresados como media ± desviación estándar, letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre los tratamientos.

Los resultados encontrados le ayudarán a tomar decisiones sobre cuál es la mejor presión de compactación para disminuir el porcentaje de jamones con defectos.

7.5. DISEÑO FACTORIAL ANÁLISIS DE LA VARIANZA DE DOS FACTORES CON INTERACCIÓN

Los diseños factoriales como el Anova de 2 factores permiten a un investigador examinar más de una variable independiente en la variable dependiente, de manera individual para cada factor, reportando una F para cada uno. Además, reporta un valor de F para la interacción entre los dos factores, dicha interacción es la influencia colectiva de los factores y es el resultado de la combinación de dos variables independientes para producir un resultado que es diferente del resultado producido por cualquiera de las variables sola.

Un Anova de 2 factores permite al investigador evaluar los efectos principales (las variables independientes) y la interacción que se produce entre los factores. El Anova de 2 factores produce tres resultados (3 F): una F para el factor 1, una F para el factor 2 y una F para la interacción entre los factores 1 y 2.

Aunque no es un requisito para el Anova de 2 factores, tener el mismo número de observaciones en cada tratamiento, lo que se conoce como diseño de equilibrio, aumenta el poder de la prueba. Sin embargo, las replicaciones desiguales (un diseño desequilibrado) son muy comunes. Algunos paquetes de *software* estadístico solo funcionan con diseños equilibrados. El *software* Minitab puede proporcionar el análisis correcto, tanto para diseños balanceados como para los no balanceados bajo el análisis estadístico Anova. Sin embargo, en aras de la simplicidad, en este capítulo se presentará un ejemplo de diseño equilibrado.

En este método se prueban las siguientes hipótesis:

H_0 : no hay interacción entre los factores.

H_a : existe una interacción significativa entre los factores.

H_0 : no hay efecto significativo del factor A sobre la variable de respuesta.

H_a : existe un efecto significativo del factor A sobre la variable de respuesta.

H_0 : no hay efecto significativo del factor B sobre la variable de respuesta.

H_a : existe un efecto significativo del factor B sobre la variable de respuesta.

Ejemplo

Supongamos que el ingeniero de alimentos quiere saber si hay relación entre el sabor a fruta de una bebida láctea y la adición de un edulcorante. El ingeniero necesita investigar no solo el efecto de los tres niveles de edulcorante sobre el sabor a fruta de la bebida A (efecto principal A) y de la bebida B (efecto principal B), sino también la relación que existe entre los dos factores de sabor a fruta y edulcorante.

El análisis de varianza bidireccional permite al ingeniero responder a la pregunta sobre si el sabor final es afectado por los sabores a fruta y los niveles de edulcorante, es decir, verificar la relación existente entre los dos factores de manera simultánea.

Este es un ejemplo de experimento factorial en el que hay un total de seis combinaciones posibles de los niveles para los dos factores diferentes (2 sabores a fruta y 3 niveles de edulcorante). Este es un experimento factorial 2×3 , donde las seis combinaciones posibles corresponden a los tratamientos. Se utiliza este tipo de di-

seño para investigar el efecto de los factores o variables independientes sobre las variables de respuesta y la interacción entre los factores.

En los experimentos factoriales se requieren múltiples réplicas de cada tratamiento. En el ejemplo, se tienen cuatro repeticiones u observaciones para cada uno de los seis tratamientos. La replicación es importante porque demuestra que los resultados son reproducibles, aumenta la precisión de las estimaciones de las medias de los tratamientos y proporciona los medios para estimar la varianza del error experimental. Los datos se muestran en la tabla 7.9.

Tabla 7.9. *Grado de aceptación de sabor (unidades arbitrarias) para dos sabores a fruta de una bebida láctea por la adición de tres niveles de edulcorante*

Sabores	Edulcorante		
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Sabor A	1,2	2,4	3,1
	2,4	2,7	3,0
	2,6	2,7	3,2
	2,2	2,9	3,4
Sabor B	0,6	2,1	0,7
	0,9	2,3	0,5
	1,0	2,0	0,6
	0,9	1,9	0,5

Fuente: elaboración propia.

Los investigadores realizan el Anova a un nivel de significancia alfa 0,05, obteniendo los resultados consignados en la tabla 7.10.



Tabla 7.10. Resultados Anova de dos factores con interacción a un nivel de significancia alfa 0,05 para los datos de la tabla 7.9. Diseño factorial análisis de la varianza de dos factores con interacción

Resumen	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Total
Sabor A				
Cuenta	4	4	4	12
Suma	8,4	10,7	12,7	31,8
Promedio	2,1	2,675	3,175	2,65
Varianza	0,38666	0,0425	0,02916	0,33545
Sabor B				
Cuenta	4	4	4	12
Suma	3,4	8,3	2,3	14
Promedio	0,85	2,075	0,575	1,16666
Varianza	0,03	0,02916	0,00916	0,48242
Total				
Cuenta	8	8	8	
Suma	11,8	19	15	
Promedio	1,475	2,375	1,875	
Varianza	0,625	0,13357	1,94785	



Análisis de varianza						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Sabor	13,2016	1	13,016	150,398	3,5535E-10	4,41387
Nivel de edulcorante	3,25333	2	1,62666	18,5316	4,2628E-05	3,55455
Interacción	4,16333	2	2,08166	23,7151	9,0248E-06	3,55455
dentro del grupo	1,58	18	0,08777			
Total	22,1983	23				

Fuente: elaboración propia.

Cuando se realiza un Anova de dos vías, siempre primero se prueba la hipótesis sobre el efecto de interacción. Si se acepta la hipótesis alterna que dice que existe una interacción significativa entre los factores, no se debe continuar con la evaluación de las hipótesis que involucran los efectos principales. Solo cuando el término de interacción no es significativo se examinan los efectos principales por separado.

Los resultados muestran que para la interacción el valor de F calculado (23,7151) es mayor que el F crítico (3,55455), por lo que se rechaza la hipótesis nula, luego sí existe una interacción significativa entre los factores. Una interacción significativa indica que el cambio en la respuesta promedio verdadera para un nivel del factor A (sabor A) depende del nivel del factor B (sabor B). El efecto de los cambios simultáneos no se puede determinar examinando los efectos principales por separado.



Conclusiones

Son muchos los diseños de experimentos que permiten obtener información relevante de un fenómeno observado en el área de la ingeniería de alimentos, ingeniería agroindustrial o afines. Aquí se estudiaron el diseño completamente al azar, el diseño de bloques completos al azar y el diseño factorial, que son los más usados y a su vez sencillos de implementar y analizar para tener una interpretación confiable de los resultados. Existen otros como la metodología de superficie de respuesta que permite encontrar las condiciones de operación óptimas de un proceso, es decir, aquellas que dan por resultado “valores óptimos” de una o varias características de calidad del producto. También es muy importante el diseño de experimentos con mezclas, donde los factores son los componentes o ingredientes de una mezcla y los niveles de dichos ingredientes no son independientes. Que este capítulo sea un primer escalón y un incentivo para que los interesados empiecen a profundizar en el diseño y análisis de experimentos aplicado a los alimentos.

Capítulo 1

- Anderson, R. B. (1946). Modifications of the Brunauer, Emmett and Teller Equation. *ACS Publications*, 68(4), 686-691. <https://doi.org/10.1021/ja01208a049>
- Amer, D. A., Albadri, A. A. M., El-Hamshary, H. A., Nehe-la, Y., Makhoulouf, A. H., El-Hawary, M. Y. y Awad, S. A. (2023). Changes in Sensory Properties, Physico-Chemical Characteristics, and Aromas of Ras Cheese under Different Coating Techniques. *Foods*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/foods12102023>
- Cedeño Sares, L. (2017). *Fundamentos básicos de cálculos de ingeniería química con enfoque en alimentos*. Editorial UTMACH. <https://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/14369/3/Cap.1%20Aspectos%20b%C3%A1sicos%20del%20Balance%20de%20Materia.pdf>
- Codex Alimentarius. Normas Internacionales de los Alimentos. (2021). Secciones 3 y 4 del “Sistema internacional de numeración para aditivos alimentarios” actualizadas periódicamente.
- Duizer, L. M. y Field, K. (2015). Modifying Food Texture. 2 -Changes in sensory perception during aging. Editor(s): Jianshe Chen y Andrew Rosenthal, En *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, 2, 19-44. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-334-8.00002-X>
- Guggenheim, E. A. (1966). *Application of statistical mechanics*. Oxford Press.

- Hernández Ruiz de Eguilaz, M., Martínez de Morentin Aldabe, B., Almiron-Roig, E., Pérez-Diez, S., San Cristóbal Blanco, R., Navas-Carretero, S. y Martínez, J. A. (2017). Influencia multisensorial sobre la conducta alimentaria: ingesta hedónica. *Endocrinol Diabetes Nutr.*, 65(2), 114-125. <https://doi.org/10.1016/j.endinu.2017.09.008>
- Irlles Rocamora, J. A. y García-Luna, P. P. (2014). El menú de textura modificada; valor nutricional, digestibilidad y aportación dentro del menú de hospitales y residencias de mayores. *Nutrición Hospitalaria*, 29(4), 873-879. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=309231669021>
- Lingjun, M. (2023). A preface for the special issue: Oxidation in food. *Food Chemistry: X*, 18, 100729. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100729>
- Madrid Vicente, A. (2016). *Ingeniería y producción de alimentos diagrama de flujo y detalles de la elaboración de todo tipo de alimentos* (1.ª ed.). AMV Ediciones. https://dama.umh.es/permalink/34CVA_UMH/1c61uvt/alma991000664439706331
- Mathias-Rettig, K. y Ah-Hen, K. (2014). El color en los alimentos un criterio de calidad medible. *Agro Sur*, 42(2), 57-66. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2014.v42n2-07>
- Orozco Colonia, B. S., De Melo Pereira, G. V., De Carvalho, J. C., Karp, S. G, Rodrigues, C., Soccol, V. T., Schneider Fanka, L. y Soccol, C. R. (2023). Deodorization of algae biomass to overcome off-flavors and odor issues for developing new food products: Innovations, trends, and applications. *Food Chemistry Advances*, 2, 100270. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100270>
- Peinado, J. y Graeml, A. R. (2007). Administração da produção: operações industriais e de serviços. UnicenP. <https://www.paulorodrigues.pro.br/arquivos/livro2folhas.pdf>
- Rodríguez-Restrepo, R. A., Valdés-Restrepo, M. P., Ortiz-López, J. J. y Ortiz-Grisales, S. (2023). Carotenogénesis y pigmentos en Cucurbita spp. *Revista. U.D.C.A Act. & Div. Cient.*, 26(1), e2218. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2218>
- Sánchez Juan, R. (2013). La química del color en los alimentos. *Química Viva*, 12(3), 234-246. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86329278005>

Sicheng, S., Yucen, X., Ren, Y., Mei-Jun Z., Shyam S. y Juming, T. (2023). The influence of temperature and water activity on thermal resistance of *Salmonella* in milk chocolate. *Food Control*, 143, 109292. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109292>

Torres, J. D., González, K. y Acevedo Correa, D. (2015). Análisis del perfil de textura en frutas, productos cárnicos y quesos. *Revista ReCiTeLA*, 14(2), 63-75. https://www.researchgate.net/publication/283352303_Analisis_del_Perfil_de_Textura_en_Frutas_Productos_Carnicos_y_Quesos

Valdés-Restrepo, M. P., Delgado Ospina, J., Londoño-Hernández, L. y Rodríguez-Restrepo, R. A. (2023). Sistema de medición del color como parámetro de calidad en la industria de alimentos. *Temas Agrarios*, 28(1), 69-81. <https://doi.org/10.21897/rta.v28i1.3200>

Valdés-Restrepo M. P., Londoño Hernández L. y Ortiz Grisales S. (2023a). Panificación con harinas compuestas de trigo y ahuyama (*Cucurbita moschata* Duchesne) *Temas Agrarios*, 28(1), 46-55. <https://doi.org/10.21897/rta.v28i1.3198>

Vázquez-Frías, R., Ladino, L., Bagés-Mesa, M. C., Hernández-Rosiles, V., Ochoa-Ortiz, E., Alomía, M., Bejarano, R., Boggio-Marzet, C., Bojórquez-Ramos, M. C., Colindres-Campos, E., Fernández, G., García-Bacallao, E., González-Cerda, I., Guisande, A., Guzmán, C., Moraga-Mardones, F., Palacios-Rosales, J., Ramírez-Rodríguez, N. E., Roda, J., Sanabria, M. C., ... Koletzko, B. (2023). Consenso de alimentación complementaria de la Sociedad Latinoamericana de Gastroenterología, Hepatología y Nutrición Pediátrica: COCO 2023. *Revista de Gastroenterología de México*, 88(1), 57-70, <https://doi.org/10.1016/j.rgmx.2022.11.001>

Yamamoto, T. y Inui-Yamamoto, C. (2023). The flavor-enhancing action of glutamate and its mechanism involving the notion of kokumi. *npj Sci Food*, 7(3). <https://doi.org/10.1038/s41538-023-00178-2>

Capítulo 2

Bartholomai, A. (1991). *Fábricas de Alimentos - Procesos, equipamiento, costos*. Acribia. https://www.editorialacribia.com/libro/fabricas-de-alimentos-procesos-equipamiento-costos_53719/



- Carbonero Zalduegui, P. (1975). *Bioquímica de las fermentaciones*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. ISBN 8460067548. <https://oa.upm.es/55235/>
- Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y la Alimentación [CTNC]. (2005). *Secado térmico*. Agro Waste. <https://www.ctnc.eu/>
- Fausto, A. (2023). *Estudio experimental y diseño de un proceso de ósmosis inversa para concentrar una corriente enriquecida en compuestos fenólicos procedentes de 120 m³/día de extractos hidroalcohólicos de alperujo*. Universidad Politécnica de Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/195993>
- Gigante, F. N. (2018). *Principios de la preparación de alimentos*. Montevideo, Uruguay: Publicaciones-Comisión Sectorial de Enseñanza, Universidad de la República. <https://www.cse.udelar.edu.uy/wp-content/uploads/2018/12/Principios-de-la-preparacio%CC%81n-de-alimentos-Noguera-2018.pdf>
- Grases Freixedas, F., Costa Bauzá, A. y Söhnel, O. (2000). *Cristalización en disolución. Conceptos básicos*. Editorial Reverté. <https://books.google.com.do/books?id=73EtcO0j1i0C&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- Ibarz, A. y Barbosa-Cánovas, G. V. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*. Mundi Prensa.
- Integración, C. d. (2018). Introducción. Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Rosario - Depto. de Ingeniería Química. <https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/departamentos/quimica/files/2017/Integraci%C3%B2n%20II.pdf>
- Kanchi, S., Sabela, M. I., Bisetty, K., & Ahmed, S. (2017). *Adsorption and ion exchange: Basic principles and their application in food processing*. Materials Research Foundations, 15, 277–298. Materials Research Forum LLC. <https://doi.org/10.21741/9781945291333-10>
- Maluenda, P. D. (1991). *El sistema de análisis de riesgos y puntos críticos: su aplicación a las industrias de alimentos*. Acribia. https://www.editorialacribia.com/libro/el-sistema-de-analisis-de-riesgos-y-puntos-criticos-su-aplicacion-a-las-industrias-de-alimentos_54391/

Marialina Anria, A. G. (2019). Modelado de la isoterma de adsorción de zanahorias. *Revista I+D Tecnológico*, 15(1), 17-23.

https://www.researchgate.net/publication/330768109_Modelado_de_la_isoterma_de_adsorcion_de_zanahorias_deshidratadas

Mazariegos Barajas, D. (2006). Secado de arroz con cáscara en un lecho fluidizado al vacío, empleando vapor sobrecalentado. Universidad de las Américas Puebla. Sta. Catarina Mártir. https://www.researchgate.net/publication/47785627_Secado_de_Arroz_con_Cascara_en_un_lecho_fluidizado_al_vacio_empleando_vapor_sobrecalentado

McCabe, W. L., Smith, J. C., Harriott, P. (1993). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. (4.^a ed.). McGraw-Hill. <https://ingenieriapetroquimicaunefazulia.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/05/operaciones-unitarias-a.pdf>

McCabe, W. L., Smith, J. C. y Harriott, P. (2019). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. (7.^a ed.). McGraw-Hill.

<http://librodigital.sangregorio.edu.ec/librosusgp/14698.pdf>

Parry, R. T. (1995). *Envasado de los alimentos en atmósfera modificada*. <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-odepa-123456789-38926>

Ramírez-Navas, J. S. (2006). Liofilización de alimentos. Universidad del Valle. *ReCi-TelA*, 6(2), 1-39. https://www.researchgate.net/publication/259620189_Liofilizacion_de_alimentos

Rees, J. A. G., Bettison, J. y Ducar Maluenda, P. (1991). *Procesado térmico y envasado de los alimentos*. Acribia. <https://search.worldcat.org/es/title/procesado-termico-y-ensado-de-los-alimentos/oclc/34205048>

Secado Térmico. (2005). Obtenido de Agro Waste - Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y la Alimentación. <https://studylib.es/doc/5000882/secado-t%C3%A9rmico>

Social, M. D. (2013). *Resolución 2674*. Ministerio de Salud y Protección Social. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-2674-de-2013.pdf>



Valiente Barderas, A. (2010). *Absorción*. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.

Vollrath, H. (2005). *Fundamentos de tecnología química para formación profesional*. Editorial Reverté.

Capítulo 3

Croney, C. y Swanson, J. (2023). Is meat eating morally defensible? Contemporary ethical considerations. *Animal Frontiers*, 13(2), 61-67. <https://doi.org/10.1093/af/vfac097>

Mason-D’Croz, D., Barnhill, A., Bernstein, J., Bogard, J., Dennis, G., Dixon, P., Fanzo, J., Herrero, M., McLaren, R., Palmer, J., Rieder, T., Rimmer, M. y Faden, R. (2022). Ethical and economic implications of the adoption of novel plant-based beef substitutes in the USA: a general equilibrium modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 6(8), e658-e669. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00169-3](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00169-3)

Rouger, A., Tresse, O. y Zagorec, M. (2017). Bacterial Contaminants of Poultry Meat: Sources, Species and Dynamics. *Microorganisms*, 5(3), 50. <https://doi.org/10.3390/microorganisms5030050>

Stadnik, J. 2024. Nutritional Value of Meat and Meat Products and Their Role in Human Health. *Nutrients*, 16(10), 1446; <https://doi.org/10.3390/nu16101446>

Capítulo 4

Ağgündüz, D., Yılmaz, B., Şahin, T. Ö., Güneşliol, B. E., Ayten, Ş., Russo, P., Spano, G., Rocha, J. M., Bartkiene, E. y Özogul, F. (2021). Dairy lactic acid bacteria and their potential function in dietetics: The Food–Gut–Health Axis. *Foods*, 10(12), 1-33. <https://doi.org/10.3390/foods10123099>

Ahtesh, F. B., Stojanovska, L. y Apostolopoulos, V. (2018). Anti-hypertensive peptides released from milk proteins by probiotics. *Maturitas*, 115, 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2018.06.016>

- Anand, S., Som Nath, K. y Chenchaiyah, M. (2013). Whey and whey products. *Milk and Dairy Products in Human Nutrition: Production, Composition and Health*, 477-497. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118534168.ch22>
- Ashoorirad, M., Baghbani, R., y Ghalamboran, M. R. (2021). Bioimpedance sensor to detect water content in milk based on van Der Pauw method. *IET Nanobiotechnology*, 15(7), 611-618. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34695295/>
- Banerjee, P. y Qamar, I. (2022). Insights into the technological and nutritional aspects of lactic milk drinks: buttermilk. *Advances in Dairy Microbial Products*, 93-103. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85793-2.00002-3>
- Batista, P., Rodrigues Penas, M., Pintado, M. y Oliveira-Silva, P. (2022). Kombucha: Perceptions and Future Prospects. *Foods*, 11(13), 1977. <https://doi.org/10.3390/foods11131977>
- Bauland, J., Bouchoux, A., Croguennec, T., Famelart, M. H. y Guyomarc'h, F. (2022). Atomic force microscopy to assess the mechanical properties of individual casein micelles. *Food Hydrocolloids*, 128, 107577. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107577>
- Calvache, I. y Navas, A. (2012). Factores que influyen en la composición nutricional de la leche. *Revista Ciencia Animal*, 1(5), 73-85. <https://revistas.lasalle.edu.co/index.php/ca/article/view/3609>
- Capcanari, T., Chirsanova, A., Covaliov, E. y Siminiuc, R. (2021). Development of Lactose Free Yogurt Technology for Personalized Nutrition. *Food and Nutrition Sciences*, 12(11), 1116-1135. <https://doi.org/10.4236/fns.2021.1211082>
- Cerón, J. M. y Correa, H. J. (2005). Factores nutricionales que afectan la producción de la leche. Pabón Restrepo, M. y Ossa Londoño J. (ed). *Bioquímica, nutrición y alimentación de la vaca*. pp. 229-261. Fondo Editorial Biogénesis.
- Chatterton, D. E. W., Smithers, G., Roupas, P. y Brodkorb, A. (2006). Bioactivity of β -lactoglobulin and α -lactalbumin-Technological implications for processing. *International Dairy Journal*, 16(11), 1229-1240. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2006.06.001>

- Chaves-López, C., Serio, A., Martuscelli, M., Paparella, A., Osorio-Cadavid, E. y Suzzi, G. (2011). Microbiological characteristics of kumis, a traditional fermented Colombian milk, with particular emphasis on enterococci population. *Food Microbiology*, 28(5), 1041-1047. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2011.02.006>
- Chiliquinga Yugcha, E. G. (2017). Creación de una línea de producción a base de leche fermentada (kumis) en la Pasteurizadora Tanilact de la Provincia de Cotopaxi [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencias Administrativas]. Repositorio Institucional de la Universidad Técnica de Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/24598>
- Chuck-Hernández, C., García-Cayuela, T., y Méndez-Merino, E. (2022). Dairy-based snacks. *Snack foods*, 417-448. CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003129066-17/dairy-based-snacks-cristina-chuck-hernandez-tom%C3%A1s-garc%C3%ADa-cayuela-emilio-m%C3%A9ndez-merino>
- Cimmino, F., Catapano, A., Villano, I., Di Maio, G., Petrella, L., Traina, G., Pizzella, A., Tudisco, R. y Cavaliere, G. (2023). Invited review: Human, cow, and donkey milk comparison: Focus on metabolic effects. *Journal of Dairy Science*, 106(5), 3072-3085. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22465>
- Corredig, M., Nair, P. K., Li, Y., Eshpari, H. y Zhao, Z. (2019). Invited review: Understanding the behavior of caseins in milk concentrates. *Journal of Dairy Science*, 102(6), 4772-4782. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15943>
- Cuadros Hernández, A. F. (2015). Manual de procedimientos administrativo-financiero para la industria lechera “Gloria” en la Parroquia El Ángel, Cantón Espejo, Provincia del Carchi [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica del Norte]. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6633>
- Czyżak-Runowska, G., Wójtowski, J. A., Gogół, D., Wojtczak, J., Skrzypczak, E. y Stanisławski, D. (2020). Properties of Rennet Cheese Made from Whole and Skimmed Summer and Winter Milk on a Traditional Polish Dairy Farm. *Animals*, 10(10), 1794. <https://doi.org/10.3390/ani10101794>

- D'auria, E., Salvatore, S., Acunzo, M., Peroni, D., Pendezza, E., Di Profio, E., Fiore, G., Zuccotti, G. V. y Verduci, E. (2021). Hydrolysed Formulas in the Management of Cow's Milk Allergy: New Insights, Pitfalls and Tips. *Nutrients*, 13(8), 2762. <https://doi.org/10.3390/nu13082762>
- Da Cunha, T. M. P., Canella, M. H. M., Haas, I. C. Da S., Amboni, R. D. de M. C., Prudencio, E. S. (2022). A theoretical approach to dairy products from membrane processes. *Food Science and Technology (Brazil)*, 42, 1-9. <https://doi.org/10.1590/fst.12522>
- Da Silva Leal, K. N., Carneiro Bastos, I., Gonçalves Dias Diniz, P. H. y Carneiro de Barros, S. R. (2022). Assessment of dairy products stability by physicochemical and spectroscopic analyses and digital images. *Brazilian Journal of Food Technology*, 25:1-14. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.16421>
- Dini, I. (2019). An Overview of Functional Beverages. *Functional and Medicinal Beverages*, 1-40. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816397-9.00001-7>
- Early, R. (2012). Dairy products and milk-based food ingredients. *Natural Food Additives, Ingredients and Flavourings*, 417-445. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857095725.2.417>
- Estrada Martínez. (2011). *El libro blanco de la leche y los productos lácteos*, 1. (1ª ed.). Editorial Litho Offset Imprenta https://www.uv.mx/personal/pcervantes/files/2012/05/libro_blanco_de_la_leche.pdf
- Feijó Corrêa, J. A., De Melo Nazareth, T., Fernandes da Rocha, G. y Bittencourt Luciano, F. (2023). Bioactive Antimicrobial Peptides from Food Proteins: Perspectives and Challenges for Controlling Foodborne Pathogens. *Pathogens*, 12(3), 477. <https://doi.org/10.3390/pathogens12030477>
- Fox, P. F., Uniacke-Lowe, T., McSweeney, P. L. H., O'Mahony, J. A. (2015). Physical properties of milk. *Dairy chemistry and biochemistry*, 321-343. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-14892-2_8



- García Montes, Y. M., Vera Calle, E. R., Santacruz Terán, S. G., Castro García, M. R., Ruales Nájera, J. C. y López Vera, M. R. (2024). Growth kinetics of *Lactococcus lactis* and *Lactobacillus casei* in liquid culture medium containing as prebiotics inulin or fructose. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(3), 1258-1270. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37801661/>
- Goa, T., Beyene, G., Mekonnen, M. y Gorems, K. (2022). Isolation and Characterization of Lactic Acid Bacteria from Fermented Milk Produced in Jimma Town, Southwest Ethiopia, and Evaluation of their Antimicrobial Activity against Selected Pathogenic Bacteria. *International Journal of Food Science*. <https://doi.org/10.1155/2022/2076021>
- González, A., Ramírez, J., Jaramillo, D., López, S., Rodríguez, C., Vélez, E., Araque, G., Echevarría, N., Atehortúa, N. y Tobón, O. (2016). *Manual de producción y consumo sostenible: Gestión del recurso hídrico. Sector lácteo*. Corantioquia. <https://www.corantioquia.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/Lacteos.pdf>
- Hassanin, A. A., Osman, A., Atallah, O. O., El-Saadony, M. T., Abdelnour, S. A., Taha, H. S. A., Awad, M. F., Elkashef, H., Ahmed, A. E., Abd El-Rahim, I., Mohamed, A. y Eldomiaty, A. S. (2022). Phylogenetic comparative analysis: Chemical and biological features of caseins (alpha-S-1, alpha-S-2, beta- and kappa-) in domestic dairy animals. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 952319. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36187819/>
- Hennessy, A. A., Ross, R. P., Stanton, C., Devery, R. y Murphy, J. J. (2007). Development of dairy based functional foods enriched in conjugated linoleic acid with special reference to rumenic acid. *Functional Dairy Products*, 2(2006), 443-495. (2.^a ed.). Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9781845693107.3.443>
- Hess H. J. (2003). *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition* (2.^a ed.). Academic Press. <https://shop.elsevier.com/books/encyclopedia-of-food-sciences-and-nutrition/caballero/978-0-08-091791-7>
- Historia de la moda. (2018). [Fotografía]. <https://url.unad.edu.co/Sg2x1>
- Illikoud, N., Mantel, M., Rolli-Derkinderen, M., Gagnaire, V. y Jan, G. (2022). Dairy starters and fermented dairy products modulate gut mucosal immunity. *Immunology Letters*, 251-252, 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.imlet.2022.11.002>

- Jouki, M., Jafari, S., Jouki, A. y Khazaei, N. (2021). Characterization of functional sweetened condensed milk formulated with flavoring and sugar substitute. *Food Science & Nutrition*, 9(9), 5119-5130. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2477>
- Kietczewska, K., Jankowska, A., Dąbrowska, A., Wachowska, M. y Ziajka, J. (2020). The effect of high pressure treatment on the dispersion of fat globules and the fatty acid profile of caprine milk. *International Dairy Journal*, 102, 104607. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104607>
- Korhonen, H. y Pihlanto, A. (2006). Bioactive peptides: Production and functionality. *International Dairy Journal*, 16(9), 945-960. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2005.10.012>
- Kumar Sachan, R. S. y Karnwal, A. (2022). Advancement in cheese production technology. *Advances in Dairy Microbial Products*, 191-208. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85793-2.00023-0>
- Da Silva Leal, K. N., Carneiro Bastos, I., Gonçalves Dias Diniz, P. H. y Carneiro de Barros, S. R. (2022). Assessment of dairy products stability by physicochemical and spectroscopic analyses and digital images. *Brazilian Journal of Food Technology*, 25:1-14. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.16421>
- López B, F. N. y Sepúlveda V, J. U. (2012). Evaluation of non fat solids substitutes (NSL) in a hard dairy ice cream mix with vegetable fat. *Vitae*, 19(2), 197-206. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.10858>
- Lükewille, U. y Uhlig, H. H. (2007). Dairy products, probiotics and the health of infants and children. En M. Saarela (Ed.), *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, 2, pp. 521-539. Woodhead Publishing <https://doi.org/10.1533/9781845693107.index>
- Macedo y Ramírez R. C. y Vélez-Ruiz, J. F. (2015). Propiedades fisicoquímicas y de flujo de un yogur asentado enriquecido con microcápsulas que contienen ácidos grasos omega 3. *Información Tecnológica*, 26(5), 87-96. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000500012>
- Mahony, J. A. O. y Fox, P. F. (2014). Milk: An Overview. En *Milk Proteins* (2.^a ed). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815251-5.09991-6>

- Malmgren, B. (2007). *Evaluation of UHT milk processed by direct steam injection and steam infusion technology*. <https://www.lunduniversity.lu.se/lup/publication/28e085b9-c17e-4a86-8c0c-4854d47e08ff>
- Mazziotta, C., Tognon, M., Martini, F., Torreggiani, E. y Rotondo, J. C. (2023). Probiotics Mechanism of Action on Immune Cells and Beneficial Effects on Human Health. *Cells*, 12(1), 184. <https://doi.org/10.3390/cells12010184>
- McCarthy, O. J. (2011). Plant and Equipment: Centrifuges and Separators: Applications in the Dairy Industry. *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 175-183. (2.^a ed.). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00463-5>
- McCarthy, O. J. y Singh, H. (2009). Physico-chemical properties of milk. *Advanced Dairy Chemistry*, 3. Lactose, Water, Salts and Minor Constituents, 691-758. <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/9Z5Jmqwl/>
- Mir Khan, U. y Selamoglu, Z. (2020). Use of enzymes in dairy industry: A review of current progress. *Archives of Razi Institute*, 75(1), 131-136. <https://doi.org/10.22092/ARI.2019.126286.1341>
- Mollea, C., Marmo, L., y Bosco, F. (2013). Valorisation of Cheese Whey, a By-Product from the Dairy Industry. *Food industry*. Intech. <https://doi.org/10.5772/53159>
- Moneret-Vautrin, D. A., Hatahet, R. y Kanny, G. (2001). Protein hydrolysates: hypoallergenic milks and extensively hydrolyzed formulas. Immuno-allergic basis for their use in prevention and treatment of milk allergy. *Archives de Pédiatrie: Organe Officiel de la Société Française de Pédiatrie*, 8(12), 1348-1357. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11811032/>
- García Montes, Y. M. G., Calle, E. R. V., Terán, S. G. S., García, M. R. C., Nájera, J. C. R. y Vera, M. R. L. (2024). Growth kinetics of *Lactococcus lactis* and *Lactobacillus casei* in liquid culture medium containing as prebiotics inulin or fructose. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(3), 1258-1270. <https://www.sfpediatric.com/Novoa>, D. F. y Ramírez-Navas, J. S. (2012). Manjar blanco del Valle: un dulce de leche típico colombiano. *Tecnología Láctea Latinoamericana*, 68, 48-52. https://www.researchgate.net/publication/257890583_Manjar_Blanco_del_Valle_un_dulce_de_leche_tipico_colombiano

- Olarte Ríos, A. C. (2023). *Factibilidad comercial para la internacionalización del herpo de bocadillo y arequipe de la fábrica “La Moniquireña” hacia el mercado español*. <http://hdl.handle.net/11634/51621>
- Ong, L., Lawrence, R. C., Gilles, J., Creamer, L. K., Crow, V. L., Heap, H. A., Honoré, C. G., Johnston, K. A., Samal, P. K., Powell, I. B. y Gras, S. L. (2017). Chapter 33 - Cheddar Cheese and Related Dry-Salted Cheese Varieties. *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology*, 1, 829-863 (4.ª ed.). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417012-4.00033-8>
- Padilla Doval, J. y Zambrano Arteaga, J. C. (2021). Estructura, propiedades y genética de las caseínas de la leche: una revisión. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 16(3), 62-95. <https://doi.org/10.21615/cesmvz.5231>
- Park, Y. W. y Haenlein, G. F. W. (2013). *Milk and dairy products in human nutrition: production, composition and health*. John Wiley & Sons. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118534168>
- Penci, M. C. y Marín, M. A. (2016). Dulce de Leche: Technology, Quality, and Consumer Aspects of the Traditional Milk Caramel of South America. *Traditional Foods: General and Consumer Aspects*, 123-136.
- Pérez Sánchez, A., Blanco Gómez, Y. y Sánchez de la Fuente, D. (2023). Evaluación técnico-económica de una propuesta de planta de producción de helado de fresa en Cuba. *Tecnológicas*, 26(57), e2762. <https://doi.org/10.22430/22565337.2762>
- Pintor, A., Escalona-Buendía, H. B. y Totosaus, A. (2017). Effect of inulin on melting and textural properties of low-fat and sugar-reduced ice cream: optimization via a response surface methodology. *International Food Research Journal*, 24(4), 1728-1734.
- Pintor, M. y Totosaus, A. (2013). Functional properties of frozen dairy systems and their relation to ice cream texture: a review. *CienciaUAT*, 7(2), 55-61. <https://www.redalyc.org/pdf/4419/441942929009.pdf>
- Rahman, S. (2022). *Development and Quality Evaluation of Mixed Fruits Drinks Powder* [Doctoral dissertation, Chattogram Veterinary & Animal Sciences University].

- Ramírez-López, C. y Vélez-Ruiz, J. F. (2012). Quesos frescos: propiedades, métodos de determinación y factores que afectan su calidad. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 2(6), 131-148. https://www.researchgate.net/publication/303959697_Quesos_frescos_propiedades_metodos_de_determinacion_y_factores_que_afectan_su_calidad
- Renhe Toledo, Í. R., Chelini Pereira, D. B., Oliveira de Sá, J. F., Cerqueira dos Santos, M. C., Martins Teodoro, V. A., Resplande Magalhães, F. A., Perrone, I. T. y Fonseca da Silva, P. H. (2017). Characterization of physicochemical composition, microbiology, sensory evaluation and microscopical attributes of sweetened condensed milk. *Food Science and Technology*, 38(2), 293-298. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.34416>
- Román Ramírez, S. (2021). Análisis de factibilidad del desarrollo de 4 prototipos de dulce blando a base de leche marca Dulcería Lucy. Universidad de Santander. <https://repositorio.udes.edu.co/entities/publication/086bfd42-4a0b-4058-9393-64f1237c490e>
- Romero del Castillo Shelly, M. y Mestres Lagarriga, J. (2004). *Productos lácteos: tecnología*. Edicions UPC. <https://doi.org/10.5821/ebook-9788498802610>
- Şahin, C., Temel, F. A., Yolcu, O. C., y Turan, N. G. (2024). Simulation and optimization of cheese whey additive for value-added compost production: Hyperparameter tuning approach and genetic algorithm. *Journal of Environmental Management*, 370, 122796. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39362168/>
- Salama, H. H. y Bhattacharya, S. (2022). Advancement of yogurt production technology. In *Advances in dairy microbial products* (pp. 117-131). Woodhead Publishing.
- Salazar, E. J., Sánchez, J. D. y Giraldo, L. M. L. (2019). Características y beneficios del kéfir como probiótico: Una revisión para el mejoramiento de la salud. *Microciencia*, 8, 132-147.
- Saxelin, M., Korpela, R. y Mäyrä-Mäkinen, A. (2003). Introduction: classifying functional dairy products. *Functional Dairy Products*, 1, 1-16 Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9781855736917.1>

- Sbodio, O. A. y Revelli, G. R. (2012). Coagulación de la leche: desarrollo de un dispositivo para el “monitoreo” *online* del proceso. *Avances en la Argentina. RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 38(3), 236-246. <https://www.redalyc.org/pdf/864/86425838009.pdf>
- Schreyer, A., Britten, M., Chapuzet, J. M., Lessard, J. Y Bazinet, L. (2008). Electrochemical modification of the redox potential of different milk products and its evolution during storage. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9(3):255-264. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.07.001>
- Sfakianakis, P. y Tzia, C. (2014). Conventional and Innovative Processing of Milk for Yogurt Manufacture; Development of Texture and Flavor: A Review. *Foods*, 3(1), 176-193. <https://doi.org/10.3390/foods3010176>
- Sharma, M., Wasan, A y Sharma, R. K. (2021). Recent developments in probiotics: An emphasis on *Bifidobacterium*. *Food Bioscience*, 41, 100993. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100993>
- Shori, A. B. y Al Zahrani, A. J. (2022). Non-dairy plant-based milk products as alternatives to conventional dairy products for delivering probiotics. *Food Science and Technology*, 42, 1-14. <https://doi.org/10.1590/fst.101321>
- Singh, R., Rathod, G., Meletharayil, G. H., Kapoor, R., Sankarlal, V. M. y Amamcharla, J. K. (2022). Invited review: Shelf-stable dairy protein beverages—Scientific and technological aspects. *Journal of Dairy Science*, 105(12), 9327-9346. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22208>
- Singh, H., y Waungana, A. (2001). Influence of heat treatment of milk on cheesemaking properties. *International Dairy Journal*, 11(4-7), 543-551
- Soleimani, A., Nasrollahzadeh, A., Khomeiri, M., Dehnad, D. y Arjeh, E. (2024). Production of soft unripened cheeses using acidic and salty coagulants: Investigation of technological and sensory characteristics. *Food Science & Nutrition*, 12(5), 3214-3224. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38726401/>
- Song, Y., Wang, X., Luo, H., Wang, M. y Chen, J. (2023). Reducing the Flocculation of Milk Tea Using Different Stabilizers to Regulate Tea Proteins. *Foods*, 12(7), 1484. <https://doi.org/10.3390/foods12071484>



- Stephenson, R. C., Ross, R. P. y Stanton, C. (2021). Carotenoids in Milk and the Potential for Dairy Based Functional Foods. *Foods*, 10(6), 1263. <https://doi.org/10.3390/foods10061263>
- Stratulat, I., Britten, M., Salmieri, S., Fustier, P., St-Gelais, D., Champagne, C. P. y Lacroix, M. (2015). Enrichment of cheese with vitamin D3 and vegetable omega-3. *Journal of Functional Foods*, 13, 300-307. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.01.004>
- Talbot, G. (2015). *Specialty Oils and Fats in Food and Nutrition: Properties, Processing and Applications*. Woodhead publishing. <https://www.sciencedirect.com/book/9781782423768/specialty-oils-and-fats-in-food-and-nutrition#book-description>
- Toulouse, D. (2004). *A Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie*, 57(6), 2-7.
- Valbuena, E., Castro, G., Lima, K., Acosta, W., Bríñez, W. y Tovar, A. (2004). Calidad microbiológica de las principales marcas de leche pasteurizada distribuidas en la ciudad de Maracaibo, Venezuela. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad del Zulia*, 14(1). <https://produccioncientificcaluz.org/index.php/cientifica/article/view/15027>
- Verma, A., Meitei, N. S., Gajbhiye, P. U., Raftery, M. J. y Ambatipudi, K. (2020). Comparative Analysis of Milk Triglycerides Profile Between Jaffarabadi Buffalo and Holstein Friesian Cow. *Metabolites*, 10(12), 507. <https://doi.org/10.3390/metabo10120507>
- Watts, S. (2016). A Mini Review on Technique of Milk Pasteurization. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 5(5), 99-101. <https://www.phytojournal.com/archives/2016.v5.i5.944/a-mini-review-on-technique-of-milk-pasteurization>
- Yeboah, P. J., Wijemanna, N. D., Eddin, A. S., Williams, L. L. e Ibrahim, S. A. (2023). *Lactic Acid Bacteria: Review on the Potential Delivery System as an Effective Probiotic*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111776>
- Zemel, M. B. (2005). The Role of Dairy Foods in Weight Management. *Journal of the American College of Nutrition*, 24(sup6), 537S-546S. <https://doi.org/10.1080/07315724.2005.10719502>

Zhao, D. (2011). Isolation of Antifungal Lactic Acid Bacteria from Food Sources and Their Use to Inhibit Mold Growth in Cheese.. https://web.archive.org/web/20180721081750id_/http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1574&context=theses

Capítulo 5

Ahmed, M., Pickova, J., Ahmad, T., Liaquat, M., Farid, A. y Jahangir, M. (2016). Oxidation of Lipids in Foods. *Sarhad Journal of Agriculture*, 32(3):230-238. <https://doi.org/10.17582/journal.sja/2016.32.3.230.238>

Albisu Aguado, M. y Fernández Gil, P. (2008). Aceites y grasas industriales. *Bases la Aliment Humana*, 2ª ed. Reverté, 103-116.

Álvarez Ramírez, A. A., López Peláez, J., Meneses Urrea, L. A., Díaz Velásquez, D. M., Upegui Mayor, A. T., Arboleda Nava, J. A., Vásquez Mucúa, A. L., Gordon Botero, J., Chinchilla Giraldo, N., Uribe Ramírez, J. D., Calderón Méndez, J. A., Dagua Gómez, L. M., Bautista Casadiego, J. P., García Puerta, M., Lectamo Caicedo, L., Triviño Vargas, G. J., Prado Díaz, A., Gutiérrez Morales, N. y Mayor Sánchez, Y. (2021). Los lípidos y sus generalidades. *Dislipidemias y estilos de vida de jóvenes*. <https://doi.org/10.35985/9789585147690>

Angelovičová, M., Angelovič, M. y Zeleňáková, L. (2021). Fatty acid profile of lamb meat in the pasture breeding system. *Fatty acid profile of lamb meat in the pasture breeding system*. <https://doi.org/10.15414/2021.9788088279136>

Argüeso Armesto, R., Díaz Díaz, J., Díaz Peromingo, J., Rodríguez González, A., Castro Mao, M., Diz-Lois, F. (2011). Lípidos, colesterol y lipoproteínas. *Galicia Clínica | Sociedade Galega de Medicina Interna*, 72(supl. 1): S7-S17.

Badui Dergal, S. (2016). *Química de los alimentos*. Pearson Educación.

Casale, J., Kacimi, S. E. O. y Varacallo, M. A. (2023). Biochemistry, Phospholipase A2. En *StatPearls*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK534851/>

Durán, P. (1999). Analíticos en alimentaria. *Métodos oficiales de Análisis. Cereales, derivados de cereales y cerveza*. Editora Panreac Química, (pp. 1-88).

- Enríquez Meza, R. (2023). Lípidos. *Revista Institucional Tiempos Nuevos*, 28(30). <https://doi.org/10.15658/rev.inst.tiempnuevos23.12283003>
- FAO (2017). Capítulo 3 – Semillas oleaginosas y sus productos. Editores OCDE-FAO *Perspectivas Agrícolas 2017-2026*. Editorial OECD (Pág. 115 -120). Publishing, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/888933576831>
- Ermatinger, R. (2023). Medidor butirométrico de Gerber. Store Norske Leksikon. <https://snl.no/butyrometer>
- Fennema, O. R., Damodaran, S. y Parkin, K. L. (2019). Introducción a la química de los alimentos. En Fennema, *Química de los alimentos*, 1-16. Acribia.
- Fleurence, J. (2021) Valorized Molecules. En Wiley (Ed.) *Microalgae: From Future Food to Cellular Factory*. (pp. 43-76). Editorial Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119854944>
- García, A. G. (2019). *Obtención de aceites comestibles a partir de nuevas semillas de girasol enriquecidas en fitoesteroles*. [Tesis Doctoral]. Instituto de la Grasa. Universidad Pablo de Olavide. <https://core.ac.uk/download/pdf/344713654.pdf>
- García-Moreno, P., Jacobsen, C., Sorensen, A. y Yesiltas, B. (2021). Lipid oxidation and traditional methods for evaluation. En García-Moreno (Ed.). *Omega-3 Delivery Systems*. Academic Press. (pp. 183-200). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821391-9.00009-0>
- Grundy, M. M. L. y Wilde, P. J. (Eds.). (2021). Plant Food Structure and Lipid Digestibility. Editores Grundy, M. *Bioaccessibility and digestibility of lipids from food*. Cham: Springer. (pp. 113-131) Editorial Espringer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56909-9_7
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. (2024). Aceites y grasas vegetales y animales comestibles. <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-grasas-y-aceites-comestibles-vegetales-y-animales-aceite-de-oliva-y-aceite-de-orujo-de-oliva-ntc258-2023.html>

- Kaur, M., Sharma, H. K., Kumar, N. (2022). Processing of Oilseeds. In: Sharma, H.K., Kumar, N. (eds) *Agro-Processing and Food Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7289-7_12
- Lorenzo, J. M., Munekata, P. E. S., Pateiro, M., Domínguez, R. y Barba, F. J. (2022). Food Lipids: Sources, Health Implications, and Future Trends. En *Food Lipids: Sources, Health Implications, and Future Trends*. Ed. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-00281-1>
- Ordóñez, N. G. A., Ortiz, G. S., Valdés, R. M. P. y Vallejo, C. F. A. (2014). Selección de introducciones de *Cucurbita* por contenido de aceite en semillas. *Acta Agronómica*, 63(2), 175-180. <https://doi.org/10.15446/acag.v63n2.40026>
- Ortiz-Grisales, S. y Valdés-Restrepo, M. P. (2019). Selecting squash (*Cucurbita* sp.) introductions by seed nutritional quality and seed meal. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 13(2), 259-268. <https://doi.org/10.17584/rcch.2019v13i2.10244>
- Pakiet, A., Jakubiak, A., Mierzejewska, P., Zwara, A., Liakh, I., Sledzinski, T. y Mika, A. (2022). The Effect of a High-Fat Diet on the Fatty Acid Composition in the Hearts of Mice. *Nutrients*, 12(3), 824. <https://doi.org/10.3390/nu12030824>
- Shahidi, F. y Hossain, A. (2022). Role of Lipids in Food Flavor Generation. *Molecules*, 27(15), 5014. <https://doi.org/10.3390/molecules27155014>
- So, K. K. Y. y Duncan, R. W. (2021). Breeding Canola (*Brassica napus* L.) for Protein in Feed and Food. *Plants*, 10(10), 2220. <https://doi.org/10.3390/plants10102220>
- Statista. (2024). Producción en millones de toneladas métricas de semillas oleaginosas en el mundo. <https://es.statista.com/estadisticas/565669/produccion-mundial-de-las-principales-semillas-oleaginosas/>
- Suaterna Hurtado, A. C. (2011). La fritura de los alimentos: el aceite de fritura. *Perspectivas en Nutrición Humana*, 11(1), 39-53. <https://doi.org/10.17533/udea.penh.9390>
- Tommonaro, G. y Tramice, A. (2023). *Fatty Acids from Marine Organisms*. MD-PI-Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-9089-9>

- Torzillo, G., Chini Zittelli, G., Silva Benavides, A. M., Ranglova, K. y Masojidek, J. (2021). Culturing of microalgae for food applications. Editor: Lafarga, T y Acien, G. *Cultured Microalgae for the Food Industry*. (pp. 1-48). Editorial Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821080-2.00002-2>
- Valdés, M. P., Ortiz, S. y Vallejo, F. (2017), Heterosis for ether extract production and its components in seed of *Cucurbita argyrosperma*. *Agronomía Colombiana*, 35(3), 293-300. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180357360004>
- Valdés, M., Ordóñez, G. y Ortiz, S. (2024). Extracto etéreo en semillas de zapallo (*Cucurbita moschata* Duchesne) en tres generaciones de endocría. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(2), 113-129. <https://doi.org/10.22490/21456453.6908>
- Valdés, R. M., Ortiz, G. S., Vallejo, C. F. y Baena, G. D. (2013). Phenotypic stability of traits associated with fruit quality in butternut squash (*Cucurbita moschata* Duch.). *Agronomía Colombiana*, 31(2), 147-152.
- Waehler, R. (2023). Fatty acids: facts vs. fiction. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, 93(3), 268-288. <https://doi.org/10.1024/0300-9831/a000713>

Capítulo 6

- Abdelshafy, A. M., Rashwan, A. K. y Osman, A. I. (2024). Potential food applications and biological activities of fermented quinoa: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 144, 104339. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104339>
- Adeyemo, S. M. y Onilude, A. A. (2013). Enzymatic Reduction of Anti-nutritional Factors in Fermenting Soybeans by *Lactobacillus plantarum* Isolates from Fermenting Cereals. *Nigerian Food Journal*, 31(2), 84-90. [https://doi.org/10.1016/S0189-7241\(15\)30080-1](https://doi.org/10.1016/S0189-7241(15)30080-1)
- Chai, K. F., Ng, K. R., Samarasiri, M., y Chen, W. N. (2022). Precision fermentation to advance fungal food fermentations. *Current Opinion in Food Science*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100881>

Chen, H. (2013). *Modern Solid State Fermentation*. Netherlands: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6043-1>

Colombo, R., Pellicorio, V., Barberis, M., Frosi, I. y Papetti, A. (2023). Recent advances in the valorization of seed wastes as source of bioactive peptides with multifunctional properties. *Trends in Food Science & Technology*, 144, 104322. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104322>

Cruz-Casas, D. E., Aguilar, C. N., Ascacio-Valdés, J. A., Rodríguez-Herrera, R., Chávez-González, M. L. y Flores-Gallegos, A. C. (2021). Enzymatic hydrolysis and microbial fermentation: The most favorable biotechnological methods for the release of bioactive peptides. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2021.100047>

El Sheikha, A. F. y Hu, D. M. (2020). Molecular techniques reveal more secrets of fermented foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(1), 11-32. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1506906>

Garnås, E. (2023). Fermented Vegetables as a Potential Treatment for Irritable Bowel Syndrome. *Current Developments in Nutrition*, 7(3), 100039. <https://doi.org/10.1016/j.cdnut.2023.100039>

Ghimire, B. K., Yu, C. Y., Kim, W.-R., Moon, H.-S., Lee, J., Kim, S. H. y Chung, I. M. (2023). Assessment of Benefits and Risk of Genetically Modified Plants and Products: Current Controversies and Perspective. *Sustainability*, 15(2), 1722. <https://doi.org/10.3390/su15021722>

Hongu, N., Kim, A. S., Suzuki, A., Wilson, H., Tsui, K. C. y Park, S. (2017). Korean *kimchi*: promoting healthy meals through cultural tradition. *Journal of Ethnic Foods*, 4(3), 172-180. <https://doi.org/10.1016/j.jef.2017.08.005>

Isique Huaroma, J. C. (2014). *Elaboración de quesos*. Editorial Macro.

Koo, O. K., Lee, S. J., Chung, K. R., Jang, D. J., Yang, H. J. y Kwon, D. Y. (2016). Korean traditional fermented fish products: *jeotgal*. *Journal of Ethnic Foods*, 3(2), 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.jef.2016.06.004>

- Londoño-Hernández, L., Ramírez-Toro, C., Ruiz, H. A., Ascacio-Valdés, J. A., Aguilar-González, M. A., Rodríguez-Herrera, R. y Aguilar, C. N. (2017). *Rhizopus oryzae*—Ancient microbial resource with importance in modern food industry. *International Journal of Food Microbiology*, 257, 110-127. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28651077/>
- Londoño-Hernández, L., Ruiz, H. A., Toro, C. R., Ascacio-Valdes, A., Rodríguez-Herrera, R., Aguilera-Carbo, A., Tubio, G., Pico, G., Prado-Barragan, A. y Gutiérrez-Sánchez, G. (2020). Advantages and Progress Innovations of Solid-State Fermentation to Produce Industrial Enzymes. En *Microbial Enzymes: Roles and Applications in Industries*, 87-117. Springer.
- López-Pedrouso, M., Zaky, A. A., Lorenzo, J. M., Camiña, M. y Franco, D. (2023). A review on bioactive peptides derived from meat and by-products: Extraction methods, biological activities, applications and limitations. *Meat Science*, 204, 109278. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109278>
- Mitchell, D. A., Krieger, N. y Berovic, M. (2006). *Solid state fermentation bioreactors - Fundamental of design and operation*. Springer, 19.
- Muñoz de Malajovich, M. A. (2013). *Biotecnología: (2 ed.)*. Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes. <https://elibro-net.bibliotecavirtual.unad.edu.co/es/lc/unad/titulos/77596>
- Rodríguez, L. (2022). La cerveza, una bebida con historia. *Rev Esp Nutr Comunitaria*, 28(2), 49. <https://doi.org/10.14642/RENC.2022.28.S2.5421>
- Ruiz-Leza, H. A., Rodríguez-Jasso, R. M., Rodríguez-Herrera, R., Contreras-Esquivel, J. C. y Aguilar, C. N. (2007). Diseño de biorreactores para fermentación en medio sólido. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 6(1), 33-40. <https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=62060105>
- Song, H. S., Lee, S. H., Ahn, S. W., Kim, J. Y., Rhee, J. K. y Roh, S. W. (2021). Effects of the main ingredients of the fermented food, kimchi, on bacterial composition and metabolite profile. *Food Research International*, 149, 110668. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110668>

Tadesse, S. A. y Emire, S. A. (2020). Production and processing of antioxidant bio-active peptides: A driving force for the functional food market. *Heliyon*, 6(8), e04765. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04765>

Tomar, S., Pant, K., Sharma, P., Sinha, S. y Mitra, D. (2023). Unravelling the hidden ethnic fermented treasure of the Himalayas - A review on the traditionally fermented beverages of the Northwest Indian Himalayan Region. *Food Chemistry Advances*, 2, 100254. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100254>

Tortora, G. J., Funke, B. R. y Case, C. L. (2007). *Introducción a la microbiología*. Ed. Médica Panamericana.

Xiang, H., Sun-Waterhouse, D., Waterhouse, G. I. N., Cui, C. y Ruan, Z. (2019). Fermentation-enabled wellness foods: A fresh perspective. *Food Science and Human Wellness*, 8(3), 203-243. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.08.003>

Zhang, Y., He, S. y Simpson, B. K. (2018). Enzymes in food bioprocessing — novel food enzymes, applications, and related techniques. *Current Opinion in Food Science*, 19, 30-35). <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.12.007>

Capítulo 7

Gutiérrez Pulido, H. y De la Vara Salazar, R. (2013). *Análisis y diseño de experimentos*, 736. (3ª ed.). McGraw-Hill/Interamericana.



Sello Editorial

Universidad Nacional
Abierta y a Distancia

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA
Y A DISTANCIA (UNAD)**

Sede Nacional José Celestino Mutis

Calle 14 Sur 14-23

PBX: 344 37 00 - 344 41 20

Bogotá, D.C., Colombia

www.unad.edu.co

Escanear el código para acceder a
la versión en línea de este libro.

