





EDITORIAL UNIVERSIDAD DE CALDAS

Práctica de operaciones unitarias en ingeniería de alimentos

Alexandra Duarte Castillo
Luis Fernando Mejía
Félix Octavio Díaz



EDITORIAL UNIVERSIDAD DE CALDAS

Duarte Castillo, Alexandra

Práctica de operaciones unitarias en ingeniería de alimentos / Alexandra Duarte Castillo, Luis Fernando Mejía, Félix Octavio Díaz. -- Manizales: Universidad de Caldas, 2023.

276 p. : il.

ISBN: 978-958-759-374-7

Industrias alimenticias/ Tecnología de alimentos /Refrigeración de alimentos/ Tratamiento térmico de alimentos/Procesamiento de alimentos/ Mejía, Luis Fernando, coautor, Díaz, Félix Octavio, coautor /Tit./CDD 664.02/D812

Reservados todos los derechos

© Universidad de Caldas

© Alexandra Duarte Castillo

ORCID: 0000-0003-4056-3329

© Luis Fernando Mejía

ORCID: 0000-0002-2485-2377

© Félix Octavio Díaz

ORCID: 0000-0002-1202-2376

Primera edición: 2023

Libros de texto

ISBN: 978-958-759-374-7

ISBN Pdf: 978-958-759-375-4

ISBN Epub: 978-958-759-376-1

Editorial Universidad de Caldas

Calle 65 N.º 26-10

Manizales, Caldas –Colombia

<https://editorial.ucaldas.edu.co/>

Editor: Ángela Patricia Jiménez Castro

Coordinadora editorial: Yolanda González Gil

Diseño de colección Luis Osorio Tejada

Corrección de estilo: Jorge Iván Escobar Castro

Diagramación de páginas: Natalia Aguirre Henao

Diseño de cubierta: Edward Leandro Muñoz Ospina

Impreso y hecho en Colombia

Printed and made in Colombia

Todos los derechos reservados. Este libro se publica con fines académicos. Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta publicación, así como su circulación y registro en sistemas de recuperación de información, en medios existentes o por existir, sin autorización escrita de la Universidad de Caldas.

Universidad de Caldas | Vigilada Mineducación. Creada mediante Ordenanza Nro. 006 del 24 de mayo de 1943 y elevada a la categoría de universidad del orden nacional mediante Ley 34 de 1967. Acreditación institucional de alta calidad, 8 años: Resolución N.º 17202 del 24 de octubre de 2018, Mineducación.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	19
CAPÍTULO 1	
Calidad en alimentos	21
Contenido y actividad del Agua en los alimentos	21
Modelo de BET (Brunauer-Emmet-Teller)	25
Modelo de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer)	26
Modelo de Henderson	27
Modelo de Caurie	27
Calidad del agua	28
Tratamientos del agua	29
Normas técnicas para la calidad del agua	30
Cárnicos	31
Calidad en productos cárnicos procesados	31
NTC para el control de calidad de la carne y sus derivados	32
Lácteos	33
Calidad en productos lácteos	33
Frutas y hortalizas	34
NTC para la calidad en frutas, verduras y hortalizas	34
Operaciones especiales para mejorar la calidad de frutas y hortalizas	35
Cereales	37
NTC para el control de calidad en cereales	37
Prácticas de laboratorio sobre calidad en alimentos	39
Práctica 1. Calidad en productos cárnicos	39
Introducción	39

Objetivo general	39
Objetivos específicos	39
Marco Teórico	40
Materiales y equipos	42
Procedimiento	42
Tabla de datos	47
Cuestionario y resultados	50
Práctica 2. Calidad en productos lácteos	51
Introducción	51
Objetivo general	52
Objetivos específicos	52
Marco Teórico	52
Propiedades fisicoquímicas de la leche	53
Materiales y equipos	54
Procedimiento	54
Cuestionario y resultados	63
Práctica 3. Calidad en frutas y hortalizas	63
Introducción	63
Objetivo general	64
Objetivos específicos	64
Marco Teórico	64
Materiales y equipos	66
Procedimiento	66
Cuestionario y resultados	72
Práctica 4. Calidad en cereales y derivados	73
Introducción	73
Objetivo general	74
Objetivos específicos	74
Marco Teórico	74
Materiales y equipos	77

Procedimiento	77
Cuestionario y resultados	84
Tabla de análisis organoléptico del pan	84
Referencias	86
CAPÍTULO 2	
Propiedades fisicoquímicas de los alimentos	89
Densidad (ρ)	90
Conductividad térmica (K)	90
Calor específico	91
Difusividad térmica (α)	92
Modelos matemáticos	93
Modelos generales	93
Modelos específicos	95
Datos experimentales	97
Viscosidad	99
Prácticas de laboratorio sobre reología	103
Práctica 1. Determinación experimental de la viscosidad	103
Introducción	103
Objetivo general	103
Objetivos específicos	103
Materiales y equipos	105
Procedimiento	106
Tabla de Resultados	108
Preguntas	108
Referencias	109

CAPÍTULO 3

Operaciones unitarias con transferencia de fluidos 111

Flujo en tuberías 112

Número de Reynolds 113

Pérdidas de carga 114

Pérdidas lineales en flujo laminar 114

Pérdidas lineales en flujo turbulento 117

Pérdidas singulares 120

Caída de presión 122

Perfil de velocidad 123

Prácticas de laboratorio sobre movimiento de fluidos 125

Práctica 1. Pérdida de carga en bombas 125

Introducción 125

Objetivo general 126

Objetivos específicos 126

Marco Teórico 127

Materiales y equipos 135

Procedimiento 136

Tabla de datos 137

Resultados 137

Referencias 138

CAPÍTULO 4

Operaciones unitarias de transferencia de calor 139

Conducción 139

Conducción de calor en estado estacionario 140

Conducción de calor en estado transitorio 144

Convección	150
Convección natural	150
Convección forzada	150
Determinación de coeficiente convectivo	151
Convección natural en fluidos	151
Convección forzada	152
Radiación	156
Prácticas de laboratorio sobre operaciones con transferencia de calor	159
Práctica 1. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor	159
Introducción	159
Objetivo general	160
Objetivos específicos	161
Marco Teórico	161
Materiales y equipos	165
Procedimiento	166
Resultados	167
Tabla de datos	167
Práctica 2. Enfriamiento y congelación de alimentos	168
Introducción	168
Objetivo general	168
Marco Teórico	169
Materiales y métodos.	172
Procedimiento	173
Resultados	174
Tabla de datos	175

Práctica 3. Evaporación en marmita	176
Introducción	176
Objetivo general	176
Objetivos específicos	176
Marco Teórico	177
Materiales y métodos	180
Procedimiento	181
Resultados	183
Tabla de datos	183
Práctica 4. Secado de alimentos	184
Introducción	184
Objetivo general	184
Objetivos específicos	184
Marco Teórico	185
Materiales y equipos	194
Procedimiento	195
Resultados	195
Tabla de datos	196
Práctica 5. Freído de alimentos por inmersión	196
Introducción	196
Objetivo general	196
Objetivos específicos	197
Marco Teórico	197
Materiales y métodos	202
Procedimiento	203
Resultados	205
Tabla de datos	206
Referencias	207

Operaciones unitarias de transferencia de masa	209
Difusión	211
Principios de difusión	211
Ley de Fick	212
Extracción	213
Extracción sólido-líquido	214
Extracción líquido-líquido	216
Destilación	218
Equilibrio líquido-vapor (ELV)	219
Prácticas de laboratorio sobre operaciones con transferencia de masa	221
Práctica 1. Determinación del coeficiente de difusión en gases	221
Introducción	221
Objetivo general	222
Objetivos específicos	222
Marco Teórico	222
Materiales y equipos	225
Procedimiento	226
Resultados	226
Práctica 2. Difusión molecular en geles biológicos en estado transitorio	227
Introducción	227
Objetivo general	227
Objetivos específicos	227
Marco Teórico	227
Materiales y equipos	228
Procedimiento	229
Resultados	229
Tabla de datos	229

Práctica 3. Extracción sólido-líquido	230
Introducción	230
Objetivo general	230
Objetivos específicos	230
Marco Teórico	230
Materiales y equipos	232
Procedimiento	232
Resultados	233
Práctica 4. Secado por aspersion	234
Introducción	234
Objetivo general	234
Objetivos específicos	234
Marco Teórico	234
Materiales y equipos	237
Procedimiento	237
Resultados	238
Tabla de datos	239
Práctica 5. Liofilización	239
Introducción	239
Objetivo general	240
Objetivos específicos	240
Marco Teórico	240
Materiales y equipos	244
Procedimiento	245
Resultados	246
Tabla de datos	246
Referencias	247

CAPÍTULO 6

**Operaciones unitarias con tratamiento de sólidos.
aplicación en café**

249

Trilla

249

Tostión

250

Molienda

251

Composición química

251

Preparación de la bebida de café

252

Prácticas de laboratorio sobre operaciones con sólidos

255

Práctica 1. Torrefacción, molienda y tamizado

255

Introducción

255

Objetivo general

255

Objetivos específicos

256

Marco Teórico

256

Materiales y equipos

264

Procedimiento

265

Resultados

266

Tabla de datos

267

Práctica 2. Extracción sólido-líquido (lixiviación)

267

Introducción

267

Objetivo general

268

Objetivos específicos

268

Marco Teórico

268

Materiales y métodos

272

Procedimiento

273

Resultados

273

Referencias

274

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. <i>Contenido de agua en algunos alimentos</i>	22
Tabla 1.2. <i>Actividad del agua en algunos alimentos</i>	23
Tabla 1.3. <i>Criterios de calidad del agua</i>	28
Tabla 1.4. <i>Normas Técnicas Colombianas para el análisis del agua</i>	30
Tabla 1.5. <i>Especificaciones de calidad de productos cárnicos</i>	31
Tabla 1.6. <i>Normas Técnicas Colombianas para el control de calidad de la carne</i>	32
Tabla 1.7. <i>Normativa colombiana para leches y sus derivados</i>	33
Tabla 1.8. <i>Normativa colombiana para productos procesados lácteos</i>	34
Tabla 1.9. <i>Normativa colombiana para frutas y hortalizas</i>	35
Tabla 1.10. <i>Normativa colombiana para cereales</i>	37
Tabla 1.11. <i>Práctica de cárnicos, materiales y reactivos requeridos</i>	42
Tabla 1.12. <i>Práctica de lácteos, materiales y reactivos requeridos</i>	54
Tabla 1.13. <i>Evaluación del análisis organoléptico de la leche</i>	55
Tabla 1.14. <i>Práctica de vegetales, materiales y reactivos requeridos</i>	66
Tabla 1.15. <i>Práctica de cereales, materiales y reactivos requeridos</i>	77
Tabla 2.1. <i>Modelos matemáticos para determinar las propiedades térmicas por componente en función de la temperatura</i>	94
Tabla 2.2. <i>Modelos matemáticos específicos para el cálculo de propiedades térmicas en alimentos</i>	96
Tabla 2.3. <i>Propiedades de algunos alimentos determinados experimentalmente</i>	98
Tabla 2.4. <i>Unidades de viscosidad</i>	100
Tabla 2.5. <i>Viscosidad en algunos de los alimentos más comunes</i>	101
Tabla 2.6. <i>Constantes y copas según rangos de viscosidad cinemática</i>	105
Tabla 3.1. <i>Factor de fricción para flujo laminar totalmente desarrollado en tuberías</i>	116
Tabla 3.2. <i>Valores experimentales de rugosidad</i>	117
Tabla 3.3. <i>Factor de fricción f</i>	117
Tabla 3.4. <i>Coefficientes de pérdida K_L para diferentes tipos de entrada de tuberías</i>	120
Tabla 3.5. <i>Perfil de velocidad para régimen laminar y turbulento</i>	123
Tabla 4.1. <i>Constates A_1, λ_1 en función del número de Biot</i>	146
Tabla 4.2. <i>Constates J_0, J_1 En función del coeficiente de Bessel</i>	147
Tabla 4.3. <i>Constantes a y b para el número de Nusselt</i>	152
Tabla 4.4. <i>Modelos matemáticos para determinar el número de Nusselt dependiendo del régimen y las características del fluido</i>	154
Tabla 4.5. <i>Magnitudes aproximadas de coeficientes de transferencia de calor</i>	156
Tabla 4.6. <i>Modelos matemáticos para determinar la transferencia de calor por radiación</i>	157
Tabla 4.7 <i>Geometría para Ψ y φ</i>	171

Tabla 4.8. <i>Parámetros α, β, δ y γ</i>	180
Tabla 4.9. <i>Solución de las ecuaciones para conducción transitoria</i>	200
Tabla 6.1. <i>Tipos de tostadores industriales</i>	257
Tabla 6.2. <i>Tamaños de partículas de acuerdo al grado de molienda</i>	263
Tabla 6.3. <i>Características y equipos según el tipo de molienda</i>	264

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua. a) oxidación de lípidos; b) reacciones hidrolíticas; c) oscurecimiento no enzimático; d) isoterma de adsorción; e) actividad enzimática; f) crecimiento de hongos; g) crecimiento de levaduras, y h) crecimiento de bacterias	24
Figura 1.2. Curvas típicas de las isotermas de adsorción y desorción de los alimentos	25
Figura 1.3. Procedimiento para determinar la calidad en productos cárnicos.	50
Figura 1.4. Procedimiento para determinar la calidad en productos lácteos	62
Figura 1.5. Procedimiento para determinar la calidad en productos vegetales	72
Figura 1.6. Calidad del arroz por mancha blanca	83
Figura 1.7. Procedimiento para determinar la calidad en cereales y derivados	83
Figura 2.1 Procedimiento para determinar la viscosidad	106
Figura 3.1 Determinación del diámetro hidráulico para distintas geometrías	113
Figura 3.2. Diagrama de Moody	119
Figura 3.3 Diagrama de proporción de diámetro vs. coeficiente de resistencia K.	133
Figura 3.4. Procedimiento para determinar la pérdida de carga en bombas	136
Figura 4.1 Diagrama T-S para el ciclo de refrigeración por compresión de vapor	161
Figura 4.2 Esquema del ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.	162
Figura 4.3. Procedimiento para el ciclo de refrigeración por compresión de vapor.	166
Figura 4.4 Cinética de la congelación de un alimento	170
Figura 4.5. Procedimiento para la refrigeración y congelación de alimentos.	173
Figura 4.6 Diagrama de Dürhring para soluciones acuosas de sacarosa	178
Figura 4.7 Procedimiento para realizar el proceso de evaporación.	181
Figura 4.8 Curva de equilibrio de humedad en el diagrama de fases	187
Figura 4.9 Cinética de secado en base seca	187
Figura 4.10 Velocidad de secado en base seca	188
Figura 4.11 Balance de materia.	193
Figura 4.12. Procedimiento para el secado de alimentos.	195
Figura 4.13. Procedimiento para el freído por inmersión de alimentos.	203
Figura 5.1. Diagrama triangular de fases líquido-líquido	217

Figura 5.2. Mecanismo de difusión molecular.	225
Figura 5.3. Procedimiento para determinar el coeficiente de difusión en gases.	226
Figura 5.4 Esquema de representación molecular.	228
Figura 5.5 Procedimiento para la difusión molecular en geles biológicos en estado transitorio.	229
Figura 5.6. Procedimiento para la extracción sólido – líquido de clorofila.	233
Figura 5.7 Balance de masa.	236
Figura 5.8. Procedimiento para el secado por aspersión.	238
Figura 5.9. Etapas del proceso de liofilización	242
Figura 5.10. Procedimiento para el secado por liofilización.	245
Figura 6.1. Algunos pasos del proceso de elaboración del café	250
Figura 6.2. Representación de retenido vs. acumulado, de acuerdo al diámetro de partícula	261
Figura 6.3 Procedimiento para la torrefacción, molienda y tamizado.	266
Figura 6.4 Diagrama del proceso de lixiviación.	269
Figura 6.5 Procedimiento para la lixiviación de café.	273

INTRODUCCIÓN

La ingeniería de alimentos abarca diversas áreas de la industria, la economía y la sociedad, destacándose la producción, desarrollo, diseño, innovación, calidad, investigación, entre otras, todas de gran importancia para la industria y la economía en cualquier parte del mundo. Estas áreas poseen una relación entre sí y con varios de los temas tratados dentro del texto, especialmente con las líneas y enfoques pertenecientes principalmente a los fenómenos de transporte, y dada su gran importancia en la ingeniería comprende varias de las prácticas a realizar. Estas prácticas son llevadas a cabo dentro del laboratorio y están diseñadas para facilitar la comprensión y el aprendizaje de los procesos y de los fenómenos de transporte, como la transferencia de movimiento, de calor y de masa. Este texto incluye los temas más destacados de la ingeniería de alimentos, distribuidos en seis capítulos que comprenden los aspectos más importantes de calidad en las principales tecnologías alimentarias incluyendo la normatividad vigente, las propiedades fisicoquímicas con un poco de reología, los fenómenos de transferencia de movimiento, calor y masa, y algunos aspectos tecnológicos del café en forma de prácticas donde se relacionan y se conectan los temas estudiados previamente a esta asignatura, de modo tal que sea facilitado el estudio y la ejecución de gran variedad de temas y conceptos vistos teóricamente a lo largo de la carrera.

Los temas, cálculos y conceptos básicos están presentados de forma fácil y resumida, en orden de conocimientos y complejidad, lo que es de gran utilidad para los estudiantes, pues un texto guía que incluya las prácticas de ingeniería de alimentos como medio al cual pueden acceder fácilmente y encontrar de manera rápida y

simplificada la información necesaria para su formación permite su desempeño en la industria y la sociedad. Asimismo provee información fácil de transmitir por parte del docente hacia los estudiantes, favoreciendo la dinámica de las clases en forma teórico-práctica.

Calidad en alimentos

En la industria de alimentos al igual que en otras industrias es necesario llevar un control de la calidad de los productos. Este control se realiza por medio de una serie de análisis en diferentes partes del proceso para garantizar la calidad e inocuidad del alimento en cada etapa. Para realizar los debidos controles de calidad es necesario implementar y seguir las legislaciones que están a cargo de las normas que se han constituido a nivel nacional e internacional con el fin de asegurar la calidad de los productos alimenticios. Dentro del presente capítulo se estudiarán temas como el control de calidad del agua, su importancia en la conservación de los alimentos y los análisis que se deben realizar a los alimentos cárnicos, lácteos, cereales y vegetales en conformidad con la respectiva normatividad vigente.

Contenido y actividad del Agua en los alimentos

El agua es el componente mayoritario en casi todos los alimentos y está presente como parte fundamental en los procesos de elaboración de los productos alimentarios, siendo en muchos casos el principal constituyente para la formulación de la mayoría de estos productos. A nivel molecular, el agua es el medio en el que ocurren todas las reacciones químicas y posee la capacidad de otorgar a los productos sus características, ya sean deseables o indeseables, debido a su considerable participación dentro de las propiedades funcionales que

poseen las moléculas que constituyen los alimentos. Por estos motivos, es esencial conocer algunas de sus características a fin de entender las interacciones del agua dependiendo del alimento y de tal manera tener un control en la calidad de los mismos (Belitz et al., 2009).

En una matriz alimentaria el agua total presente en su composición se clasifica según sus estados energéticos como agua libre y agua ligada, las cuales presentan diferencias en sus propiedades termodinámicas (presión, temperatura, entre otras). En este sentido, el agua ligada hace referencia a la fracción que no se congela a -20°C y se considera que está unida fuertemente al alimento por medio de puentes de hidrógeno o que es el agua atrapada al interior de la matriz alimentaria y que no se encuentra disponible. El agua libre es la que primero sufre un cambio de estado, congelándose o evaporándose según las condiciones y el medio en el que se encuentre. Esta, toma el papel más importante en la actividad del agua de los alimentos, por lo tanto, a mayor contenido en el alimento, mayor será su vulnerabilidad al deterioro (Badui, 2006).

Tabla 1.1. *Contenido de agua en algunos alimentos*

Alimento	Contenido de agua (%)
Lechuga, espárrago, coliflor	95
Brócoli, zanahoria	90
Manzana, durazno, naranja	88
Leche	87
Papa, pera	80
Huevo, pollo	74
Carne de res	70
Carne de cerdo, helado	60
Pan	40
Queso	45
Mantequilla	16
Galletas	5
Chocolate	2

Contenido de agua entre 2 y 95 % de algunos de los alimentos más comunes. Fuente: adaptada de Badui (2006).

La actividad del agua en cada alimento varía según la cantidad de agua libre que contenga, esto debido a que solo el agua libre es la que está disponible para que se pueda dar el crecimiento de los microorganismos y otras reacciones (Badui, 2006). Esta actividad tiene gran efecto en los procesos que se dan internamente en el alimento como a los que es sometido para su transformación, por lo cual llega a influir notablemente en la calidad del alimento y del producto final. La disminución de la actividad del agua (Ecuación 1.1) retarda el crecimiento de microorganismos, ralentiza las reacciones catalizadas por enzimas y retarda el pardeamiento no enzimático, lo que es de gran importancia para alargar y obtener un buen periodo de vida útil del alimento; periodo de tiempo en el cual el alimento contará con las características sensoriales, nutricionales y microbiológicas óptimas para el consumo y dentro del cual el agua juega un papel muy importante para alargar o acortar este lapso (Tabla 1.2) (Belitz et al., 2009).

Tabla 1.2. Actividad del agua en algunos alimentos

Alimento	a_w
Frutas frescas y enlatadas	0,97
Verduras	0,97
Jugos	0,97
Huevos	0,97
Carne	0,97
Queso	0,95
Pan	0,94
Mermeladas	0,82 – 0,94
Frutas secas	0,72 – 0,80
Miel	0,70
Galletas, cereales	0,35
Azúcar	0,10

Actividad de agua entre 0,10 y 0,97 de algunos de los alimentos más comunes. Fuente: adaptada de Badui (2006).

La actividad del agua (puede ser calculada de diferentes maneras, entre ellas se encuentran las relaciones de fugacidad, presión, humedad relativa y molar (Ecuación 1.1):

$$a_w = \frac{f}{f^0} = \frac{p}{p_0} = \frac{HR}{100} = \frac{M_a}{M_a + M_s} \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde:

a_w : Actividad del agua

f : Fugacidad del disolvente de la solución

f^0 : Fugacidad del disolvente puro

p : Presión de vapor del agua del alimento

p_0 : Presión de vapor del agua pura

HR : Humedad relativa

M_a : Moles de agua

M_s : Moles de soluto

De esta manera la fugacidad es la medida de la tendencia que tiene el líquido por escaparse de la solución, considerando termodinámicamente al vapor de agua con un comportamiento de gas ideal (Badui, 2006).

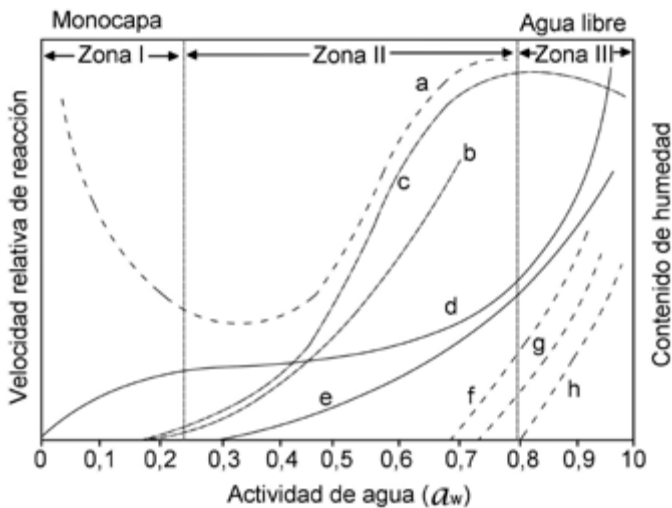


Figura 1.1. Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua. a) oxidación de lípidos; b) reacciones hidrolíticas; c) oscurecimiento no enzimático; d) isoterma de adsorción; e) actividad enzimática; f) crecimiento de hongos; g) crecimiento de levaduras, y h) crecimiento de bacterias

Fuente: adaptada de Badui (2006).

La actividad de agua está relacionada estrechamente con el contenido de humedad, lo que se representa por medio de las isotermas que representan la energía de sorción requerida o disipada durante los procesos de adsorción o desorción (Figura 1.2). De igual manera existen modelos matemáticos para la determinación de actividad del agua ampliamente utilizados como los modelos de BET, GAB, Henderson y Caurie.

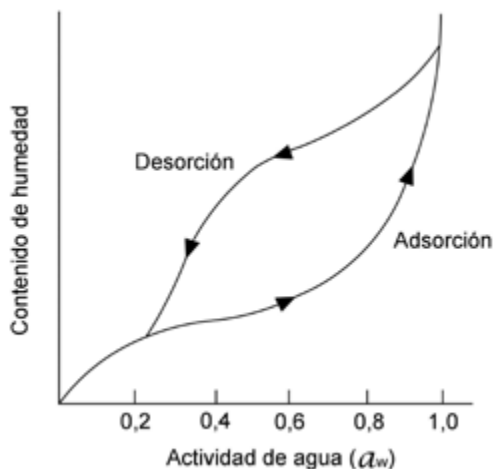


Figura 1.2. Curvas típicas de las isotermas de adsorción y desorción de los alimentos

Fuente: adaptada de Badui (2006).

Modelo de BET (Brunauer-Emmet-Teller)

Es un modelo matemático propuesto por Brunauer, Emmet y Teller en 1938, donde es representado el fenómeno de adsorción física ampliamente utilizada en las ciencias de los alimentos para la determinación del contenido de agua en relación con la vida útil de los alimentos. Sin embargo, la ecuación de BET (Ecuación 1.2) tiene su rango de aplicación a las isotermas que poseen una actividad de agua dentro del rango comprendido entre 0,1 y 0,5 (Van den Berg, 1985). El planteamiento del modelo de BET considera que la velocidad de condensación sobre la primera capa es igual a la velocidad de evaporación de la segunda capa (Martínez Navarrete, 1998).

$$X = \frac{X_m \cdot \alpha \cdot A_w}{(1 - A_w) \cdot (1 + (\alpha - 1) \cdot A_w)} \quad \text{Ec. 1.2}$$

Donde:

X : Contenido de humedad en equilibrio

X_m : Contenido de humedad con base seca para la monocapa

α : Constante característica del producto relacionada con el calor neto de adsorción

A_w : Actividad de agua

Modelo de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer)

El modelo de GAB es una modificación del modelo de BET y se ha usado ampliamente en los alimentos como una manera de correlacionar los datos experimentales de adsorción de equilibrio de estos, debido a la base teórica que posee este modelo (Cortés et al., 2012). La expresión del modelo de GAB (Ecuación 1.3) tiene en cuenta las propiedades modificadas del agua adsorbida en la región multicapas, por tanto, su expresión incluye la constante k , que mide la diferencia de potencial químico estándar entre las moléculas de la segunda etapa y aquellas del estado líquido puro (Zug y Razzitte, 2002).

$$X = \frac{\alpha \cdot X_m \cdot K \cdot A_w}{(1 - k \cdot A_w) \cdot (1 + (\alpha - 1) \cdot k \cdot A_w)} \quad \text{Ec. 1.3}$$

Donde:

X : Contenido de humedad en equilibrio

X_m : Contenido de humedad en base seca para la monocapa

α : Constante característica del producto relacionada con el calor neto de adsorción

A_w : Actividad de agua

K : Constante relacionada con el efecto de la temperatura

Modelo de Henderson

Este modelo es una ecuación empírica que posee una base termodinámica propuesta para todo el intervalo de humedades relativas. Esta expresión (Ecuación 1.4) es ampliamente utilizada ya que está en función de la temperatura (Gely y Giner, 1998).

$$X_e = 0,01 \left[\frac{-\log(1 - A_w)}{10^f} \right]^{1/n} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Donde:

X_e : Humedad en equilibrio

A_w : Actividad de agua

nyf : Parámetros característicos del producto

Modelo de Caurie

Este modelo fue específicamente desarrollado para alimentos deshidratados y su utilización es de gran importancia en el modelado de isothermas de alimentos deshidratados, ya que proporciona el parámetro llamado “contenido de humedad de seguridad”, que indica el contenido de humedad al cual se lograría la máxima estabilidad del alimento durante su almacenamiento (Ecuación 1.5) (Gálvez et al., 2006).

$$X_m = \exp \left[A_w \cdot r - \frac{1}{4,5 \cdot X_s} \right] \quad \text{Ec. 1.5}$$

Donde:

X_m : Humedad del producto

A_w : Actividad de agua

r : Constante característica del material

X_s : Contenido de humedad de seguridad que proporciona la máxima estabilidad al alimento deshidratado durante el almacenamiento