

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGÍA

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**



**“ESTUDIO DEL EFECTO DE TRES FACTORES EN LA CINÉTICA
DE TRANSFERENCIA DE MASA DE PAPAYA (*Carica papaya*)
DESHIDRATADO OSMÓTICAMENTE”**

T E S I S

PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

Presentado por :

Walter Reynán QUISPE CCAHUIN

Dirigido por :

M. Sc. Ing. Julio Fernando PÉREZ SÁEZ

Ayacucho - Perú - 2012

ACTA DE CONFORMIDAD

Los que suscribimos, miembros del jurado designado para el Acto Público de Sustentación de Tesis titulada “ESTUDIO DEL EFECTO DE TRES FACTORES EN LA CINÉTICA DE TRANSFERENCIA DE MASA DE PAPAYA (*Carica papaya*) DESHIDRATADO OSMÓTICAMENTE”, presentado por el Sr. Bachiller en Ingeniería en Industrias Alimentarias, **Walter Reynán QUISPE CCAHUÍN**, la cual fue sustentada el día jueves 02 de Mayo del año 2013 en merito a la Resolución Decanal N° 030-2013-FIQM-D; damos nuestra conformidad al trabajo final corregido, aceptando la publicación final de la mencionada Tesis y declaramos al recurrente APTO para que pueda iniciar las gestiones administrativas conducentes a la expedición y entrega del Título Profesional de Ingeniero en Industrias Alimentarias.

MIEMBROS DEL JURADO	DNI	FIRMA
Ing° Héctor SUAREZ ACOSTA	09272364	
Ing° Juan Carlos PONCE RAMIREZ	23008579	
Ing° Wuelde César DIAZ MALDONADO	28227229	

Dedicatoria

A Dios:

Por acompañarme siempre,

A mis padres:

*Aurelia y Leoncio, en virtud a su inagotable labor por forjar el futuro
de sus hijos,*

A mis hermanos:

Wilder, Carlos y Miryam, por su cariño y apoyo.

Agradecimientos

- A mis padres, por su sacrificio, apoyo constante y que siempre confiaron en mi.
- A la *Universidad Nacional San Cristobal de Huamanga* y todos los Catedraticos de la Escuela Profesional de *Ingeniería en Industrias Alimentarias*.
- Al Ingeniero Julio Fernando Pérez Sáez, la especial gratitud por su tiempo, paciencia, orientación y contribución a la elaboración del presente trabajo.
- Al Ingeniero Alfredo Arias Jara, por su paciencia, confianza y su atinada orientación.
- Así mismo, expreso mi gratitud a todas las personas, que me brindaron su apoyo y colaboración en la ejecución y desarrollo de este trabajo.

Índice general

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Índice general	VII
Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas	XV
Resumen	XVI
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo General	3
1.1.2. Objetivos Específicos	3
2. Revisión Bibliográfica	4
2.1. Frutas tropicales y papaya	4
2.1.1. Frutas tropicales	4
2.1.2. La papaya	5
2.1.2.1. Descripción botánica	6
2.1.2.2. Desarrollo del fruto	8
2.1.2.3. Composición	9
2.1.2.4. Maduración recolección y conservación del fruto	11
2.1.2.5. Tratamientos post-cosecha	12
2.1.2.6. Utilización de la planta de papaya	13
2.2. Frutas mínimamente procesadas	13

2.2.1.	Factores que influyen en la calidad de las frutas mínimamente procesadas	16
2.2.2.	Influencia del procesado en la calidad de frutas mínimamente procesadas	17
2.2.3.	Distribución y utilización de frutas y hortalizas mínimamente procesadas	19
2.2.4.	Métodos de conservación	20
2.3.	Deshidratación osmótica	21
2.3.1.	Fundamentos de la deshidratación osmótica	25
2.3.2.	Cinética de la deshidratación osmótica	27
2.3.3.	Variables que afectan el proceso de deshidratación osmótica	29
2.3.3.1.	Estructura y composición del fruto, y tamaño de las piezas	30
2.3.3.2.	Naturaleza del agente osmótico	31
2.3.3.3.	Concentración del agente osmótico	31
2.3.3.4.	Temperatura de tratamiento	32
2.3.3.5.	Presión de trabajo	33
2.3.3.6.	Efecto de la agitación del sistema	34
2.3.4.	Mecanismos de transporte durante la deshidratación osmótica	34
2.3.5.	Aplicaciones de la deshidratación osmótica	37
2.3.6.	Ventajas de la deshidratación osmótica	39
2.4.	Difusión y transferencia de masa	40
2.4.1.	Proceso de transferencia de masa	40
2.4.2.	Difusión molecular	41
2.4.2.1.	Leyes de la difusión molecular: Leyes de Fick	42
2.5.	Mecanismos de transferencia de materia presentes en la deshidratación osmótica	44
2.5.1.	Modelo matemático de transferencia de masa en deshidratación osmótica	45

2.6.	Diseño factorial general	52
2.6.1.	Diseño factorial 2^k	53
2.6.2.	Diseño factorial completo 2^3	54
3.	Materiales y Métodos	56
3.1.	Ubicación	56
3.2.	Materia prima	56
3.3.	Materiales reactivos y equipos	56
3.3.1.	Materiales	57
3.3.2.	Reactivos	57
3.3.3.	Equipos	57
3.4.	Métodos de análisis	58
3.4.1.	Características fisicoquímicas	58
3.4.2.	Análisis químico proximal	58
3.5.	Metodología Experimental	59
3.5.1.	Selección	61
3.5.2.	Lavado	61
3.5.3.	Descascarado	61
3.5.4.	Troceado	61
3.5.5.	Pesado	62
3.5.6.	Obtención de disoluciones de trabajo	62
3.5.7.	Proceso de deshidratación osmótica	63
3.5.8.	Toma de muestras y análisis	64
3.6.	Determinación de los parámetros cinéticos y difusionales	65
3.6.1.	Porcentaje de pérdida de agua (% PA)	65
3.6.2.	Porcentaje de ganancia de sólidos solubles (% GS)	65
3.6.3.	Porcentaje de pérdida de masa (% PP)	66
3.6.4.	Modelado Matemático para el cálculo de la transferencia de masa durante la DO	66
3.7.	Diseño experimental	69

3.7.1. Factores y dominio experimental	69
3.7.2. Matriz de experimentos	70
4. Resultados y Discusión	73
4.1. Evaluación sensorial de la papaya	73
4.2. Análisis proximal de la papaya	74
4.3. Cinética de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica .	75
4.3.1. Variación de masa de agua, sólidos solubles y masa total en función del tiempo	75
4.3.1.1. Pérdida de agua	75
4.3.1.2. Ganancia de Sólidos	77
4.3.1.3. Pérdida de masa	80
4.3.2. Cálculo de los parámetros cinéticos D_e^w y D_e^{ss}	82
4.4. Efecto de las variables sobre los parámetros de la deshidratación osmótica para un tiempo de proceso de 06 horas	85
4.4.1. Efecto sobre la pérdida de agua (%PA)	86
4.4.1.1. Efecto de los factores	86
4.4.1.2. Análisis de Varianza	87
4.4.1.3. Modelo de regresión para predecir la pérdida de agua .	89
4.4.2. Efecto sobre la ganancia de sólidos (%GS)	93
4.4.2.1. Efecto de los factores	93
4.4.2.2. Análisis de Varianza	93
4.4.2.3. Modelo de regresión para predecir la ganancia de sólidos	95
4.4.3. Efecto sobre la pérdida de masa (%PP)	99
4.4.3.1. Efecto de los factores	99
4.4.3.2. Análisis de Varianza	99
4.4.3.3. Modelo de regresión para predecir la pérdida de agua .	101
Conclusiones	107
Recomendaciones	108

Bibliografía	109
Anexos	120
A. Análisis químico proximal	120
A.1. Determinación del contenido de humedad (Método A.O.A.C. 1998) . . .	120
A.2. Determinación de cenizas (Método A.O.A.C. 1998)	121
A.3. Determinación de proteína (Kjeldahl) (Método A.O.A.C. 1984)	122
A.4. Determinación de extracto etéreo (Soxhlet) (Método A.O.A.C. 1998) .	123
A.5. Determinación de fibra cruda (Método A.O.A.C. 1984)	124
A.6. Determinación de carbohidratos	125
A.7. Determinación de sólidos solubles	126
B. Respuestas de %PA, %GS y %PP para cada tratamiento a diferentes tiempos de proceso	127
C. Datos experimentales para el análisis estadístico de %PA, %GS y %PP a 6 horas de proceso	129
D. Cálculo de las difusividades efectivas D_e^j	131
D.1. Tratamiento 01 (T_1)	133
D.2. Tratamiento 02 (T_2)	136
D.3. Tratamiento 03 (T_3)	139
D.4. Tratamiento 04 (T_4)	142
D.5. Tratamiento 05 (T_5)	145
D.6. Tratamiento 06 (T_6)	148
D.7. Tratamiento 07 (T_7)	151
D.8. Tratamiento 08 (T_8)	154
E. Fotografías	158
F. Matriz de consistencia	161

Índice de figuras

2.1. Frutas Tropicales	5
2.2. Invernadero de papaya (<i>Carica papaya</i>)	7
2.3. Flor masculina (a) y femenina (b) de planta de papaya	8
2.4. Frutos de la papaya	9
2.5. Diagrama de flujo de las operaciones más comunes en el procesamiento de FMP (Wiley, 1997b)	16
2.6. Daño a nivel celular originado por la operación de corte (Adaptado de Wiley, 1994)	19
2.7. Pasos principales en el procesado de productos deshidratados osmóticamente	23
2.8. Esquema de la transferencia de masa durante el proceso de deshidratación osmótica. Modificado de Guilbert <i>et al.</i> , 1996	26
2.9. Esquema de las diferentes rutas de transporte durante la deshidratación osmótica de tejidos vegetales (Adaptado de Spiazzi y Mascheroni, 1997)	29
2.10. Tipos de transporte en el tejido vegetal: Apoplástico (AP), simplástico (SP) y transmembrana (TM). (Adaptado de Albors, 2002)	35
2.11. Evolución del tejido vegetal durante el contacto con la solución concentrada (Adaptado de Le Maguer, 1997)	39
2.12. Proceso de Transferencia de materia según ley de Fick	45
3.1. Proceso de Deshidratación Osmótica de trozos de papaya	60
3.2. Corte de la papaya y obtención de cubos	62

3.3. Cesta de DO y recipiente con la solución osmótica utilizados en los experimentos.	64
3.4. Recipientes con su respectiva cesta de muestras sumergidos en un baño termostático con agitación.	64
4.1. Cinéticas de pérdida de agua para los tratamientos 1, 2, 3 y 4 durante 6 horas de proceso	76
4.2. Cinéticas de pérdida de agua para los tratamientos 5, 6, 7 y 8 durante 6 horas de proceso	77
4.3. Cinéticas de ganancia de sólidos para los tratamientos 1, 2, 3 y 4 durante 6 horas de proceso	79
4.4. Cinéticas de ganancia de sólidos para los tratamientos 5, 6, 7 y 8 durante 6 horas de proceso	79
4.5. Cinéticas de pérdida de masa para los tratamientos 1, 2, 3 y 4 durante 6 horas de proceso	81
4.6. Cinéticas de pérdida de masa para los tratamientos 5, 6, 7 y 8 durante 6 horas de proceso	82
4.7. Probabilidad normal del efecto de los factores	87
4.8. Carta estandarizada de Pareto de los datos de pérdida de agua.	89
4.9. Media de la pérdida de agua en función de la temperatura, concentración y agente osmótico	91
4.10. Probabilidad normal del efecto de los factores	93
4.11. Carta estandarizada de Pareto de los datos de ganancia de sólidos.	95
4.12. Media de la ganancia de sólidos en función de la temperatura, concentración y agente osmótico	97
4.13. Probabilidad normal del efecto de los factores	99
4.14. Carta estandarizada de Pareto de los datos de pérdida de masa.	101
4.15. Media de la pérdida de masa en función de la temperatura, concentración y agente osmótico	104

D.1. Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t	134
D.2. Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t	135
D.3. Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t	137
D.4. Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t	138
D.5. Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t	140
D.6. Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t	141
D.7. Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t	143
D.8. Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t	144
D.9. Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t	146
D.10. Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t	147
D.11. Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t	149
D.12. Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t	150
D.13. Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t	152
D.14. Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t	153

D.15.Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t	155
D.16.Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t	156
E.1. Frutos de papaya empleados para los ensayos de deshidratación osmótica	158
E.2. Muestras previamente pesadas e identificadas fueron colocados en cestas compartimentadas de geometría cuadrada.	159
E.3. Como agente osmótico se emplearon soluciones de sacarosa y jarabe de glucosa, preparados en agua destilada.	159
E.4. Reproducibilidad de las cinéticas de transferencia de masa de acuerdo al <i>diseño experimental</i>	160
E.5. Ensayos de deshidratación osmótica, Lab. <i>Transferencia de Masa</i> , Ciudad Universitaria, UNSCH.	160

Índice de Tablas

2.1. Situación botánica de la papaya	8
2.2. Composición en fresco del fruto de la papaya (Contenido en 100 g de porción comestible), según manual el cultivo del papayo en el Perú (1996)	10
2.3. Composición de los carotenos responsables del color en papaya fresca .	11
2.4. Criterios para una definición práctica de los procesos osmóticos en base a su duración (Adaptado de Lazarides et al., 1999)	26
2.5. Valores de difusividades efectivas para el agua y sólidos en diferentes frutos.	52
2.6. Notaciones diferentes para las corridas del <i>diseño factorial</i> 2^3	55
2.7. El <i>diseño factorial</i> 2^3 : (a) Vista geométrica, (b) La matriz del diseño .	55
3.1. Factores y dominio experimental.	70
3.2. Niveles codificados de las variables del diseño factorial completo 2^3 y respuestas a medir.	70
3.3. Matriz de experimentos del diseño factorial completo 2^3 con 3 repeticiones, plan de experimentación y respuestas a medir.	71
4.1. Evaluación sensorial de la papaya.	73
4.2. Análisis proximal de la papaya fresca	74
4.3. Porcentaje de pérdida de agua (% <i>PA</i>) para los ocho tratamientos a diferentes tiempos de proceso.	75
4.4. Porcentaje de ganancia de sólidos (% <i>GS</i>) para los ocho tratamientos a diferentes tiempos de proceso.	77

4.5. Porcentaje de pérdida de masa ($\%PP$) para los ocho tratamientos a diferentes tiempos de proceso.	80
4.6. Difusividades efectivas del agua y sólidos solubles para los tratamientos 1, 2, 3 y 4 durante 6 horas de proceso	82
4.7. Difusividades efectivas del agua y sólidos solubles para los tratamientos 5, 6, 7 y 8 durante 6 horas de proceso	83
4.8. Resumen de resultados experimentales del diseño factorial completo 2^3 en función de las variables independientes.	86
4.9. Análisis de varianza de los datos de pérdida de agua	88
4.10. Coeficientes de regresión del modelo polinomial en términos de las estimaciones de los efectos	89
4.11. Factores y su dominio experimental para maximizar la pérdida de agua	91
4.12. Análisis de varianza de los datos de ganancia de sólidos	94
4.13. Coeficientes de regresión del modelo polinomial en términos de las estimaciones de los efectos	95
4.14. Factores y su dominio experimental para minimizar la ganancia de solutos	97
4.15. Análisis de varianza de los datos de pérdida de masa	100
4.16. Coeficientes de regresión del modelo polinomial en términos de las estimaciones de los efectos	102
4.17. Factores y su dominio experimental para maximizar la pérdida de masa	104
B.1. Porcentaje de pérdida de agua ($\%PA$) para los ocho tratamientos a diferentes tiempos de proceso.	127
B.2. Porcentaje de ganancia de sólidos ($\%GS$) para los ocho tratamientos a diferentes tiempos de proceso.	128
B.3. Porcentaje de pérdida de masa ($\%PP$) para los ocho tratamientos a diferentes tiempos de proceso.	128
C.1. Datos experimentales para el análisis estadístico del porcentaje de pérdida de agua ($\%PA$).	129

C.2. Datos experimentales para el análisis estadístico del porcentaje de ganancia de sólidos (%GS).	130
C.3. Datos experimentales para el análisis estadístico del porcentaje de pérdida de masa (%PP).	130
D.1. Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).	134
D.2. Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s	135
D.3. Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso	136
D.4. Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).	137
D.5. Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s	138
D.6. Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso	139
D.7. Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).	140
D.8. Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s	141
D.9. Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso	142
D.10. Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).	143
D.11. Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s	144
D.12. Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso	145
D.13. Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).	146
D.14. Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s	147
D.15. Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso	148
D.16. Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).	149
D.17. Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s	150
D.18. Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso	151

D.19. Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados	
(ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).	152
D.20. Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s	153
D.21. Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso	154
D.22. Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados	
(ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).	155
D.23. Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s	156
D.24. Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso	157
F.1. Matriz de consistencia	162

Resumen

La papaya (*Carica papaya*) es un fruto de alta oferta y demanda masiva tanto a nivel nacional como internacional. Teniendo en cuenta las nuevas tendencias de consumo y comercio de alimentos y la alta producción de esta, se hace evidente la necesidad de desarrollar nuevas alternativas de uso y diversificación de los productos a ofrecer en el mercado.

El presente trabajo de investigación se ha desarrollado con el objetivo de evaluar el efecto de la temperatura de proceso, concentración de la disolución y tipo de agente osmótico usado, en la cinética de transferencia de masa de papaya deshidratado osmóticamente. Las variables independientes fueron: concentración de la disolución (disolución osmótica a 40 y 60 °Brix), temperatura de la disolución (temperatura de proceso a 30 y 40 °C), agente osmótico de la disolución (uso de la sacarosa y glucosa como solutos); mientras que las variables dependientes fueron los parámetros cinéticos y difusionales del proceso: Pérdida de agua (% PA), ganancia de soluto (% GS), pérdida de masa (% PP) y Difusividades efectivas (D_e^w y D_e^s). La experimentación fue llevado a cabo en cubos de papaya de 2 cm las cuales fueron deshidratados osmoticamente, las muestras fueron sumergidas en soluciones hipertónicas a concentraciones y temperaturas especificadas en el diseño experimental para un tiempo de 6 horas con retiradas de muestras en los tiempos: 0,5, 1, 1,5, 2, 3, 4 y 6 horas de proceso. Se determinó la variación de masa de agua (% PA), masa de sólidos solubles (% GS) y masa total (% PP) y se modeló con las ecuaciones difusionales.

Las variables concentración de solución, temperatura de solución y agente osmótico, afectan de forma significativa los parámetros cinéticos (%PA, %GS y %PP) y difusio-

nales en la deshidratación osmótica de papaya. La relación entre las variables y los parámetros cinéticos y difusionales no es lineal, por lo cual se pueden encontrar combinaciones de los valores de estas variables que producen valores máximos y mínimos para los parámetros, permitiendo obtener mejores resultados en el proceso global de deshidratación osmótica.

En el proceso de deshidratación osmótica de papaya, bajo las condiciones del presente trabajo, los cambios más importantes se presentan en las primeras 4 horas de proceso, después de las cuales los cambios de humedad, contenido de sólidos solubles y peso se desarrollan más lentamente, indicando que el sistema se está aproximando al equilibrio.

Los resultados experimentales mostraron que la papaya deshidratada osmóticamente con solución de sacarosa presentó simultáneamente, mayores tasas de pérdida de agua y menor incorporación de sólidos a lo largo del tiempo en relación al procesado con glucosa, consecuencia de las diferencias de peso molecular de los dos solutos.

La utilización de las condiciones óptimas encontradas en este trabajo para la deshidratación osmótica de papaya en forma de cubos, permitió obtener un %PA de 51.75 % y un %PP de 46.30 % como valores máximos en un periodo de 6 horas; y un %GS de 5,45 % como valor mínimo en un periodo de 6 horas. La optimización del modelo obtenido del diseño factorial completo 2^3 , para las condiciones del presente trabajo, se tiene como valores de las variables para unas respuestas máximas, una concentración de solución de 60 °Brix, temperatura de solución de 30 °C y como agente osmótico, Sacarosa.

El modelo matemático de difusión fue capaz de predecir la cinética de transferencia de masa en la deshidratación osmótica de papaya en forma de cubos, permitiendo determinar experimentalmente valores de difusividad efectiva, tanto para el agua como para los solutos a diferentes tiempos de proceso. Los valores de difusividad efectiva media ($\overline{D_e^j}$), para los valores de variables óptimas fueron: $\overline{D_e^w} = 1,309E - 08 \frac{m^2}{s}$ y $\overline{D_e^s} = 1,367E - 08 \frac{m^2}{s}$.

Capítulo 1

Introducción

La papaya (*Carica papaya*) constituye una de las más importantes fuentes que se dispone en la naturaleza de vitamina A y C. Durante el desarrollo de la fruta de papaya, el contenido de vitamina C se incrementa gradualmente, llegando al máximo valor en la madurez, 55 mg/ 100 g. Es algo excepcional que generalmente encontramos, que está demostrado en muchas frutas el decrecimiento de la vitamina C durante la maduración, lo que ocurre inversamente en este fruto. La papaya por consiguiente tiene especial interés e importancia para la nutrición.

El aumento en popularidad del consumo de frutas frescas y los requerimientos mundiales de conservación de recursos, están forzando a la Industria Alimentaria a aplicar técnicas de preservación mínimas para obtener productos de características similares a las frescas y que demanden menos energía para la estabilización, almacenamiento y distribución. Las mayores pérdidas en la producción hortofrutícola ocurren en la etapa poscosecha, donde los productos son manejados y almacenados en condiciones poco adecuadas que generan daños irreversibles a su calidad sensorial provocando alteraciones en su composición química.

La deshidratación o secado se realiza para aumentar la vida útil de los alimentos, para disminuir los costos de transporte, de empaque y de almacenamiento, para suplir las necesidades de materia prima seca como ingrediente para otros productos (yogurt, mermeladas, cereales y productos de panadería) y en el desarrollo de nuevos productos atractivos a los consumidores tales como los «snacks» de frutas. El proceso

de deshidratación generalmente se realiza por medio de un secado térmico utilizando técnicas como secado con aire, al sol y al vacío, microondas, liofilización y fritura, pero con la consecuente modificación de las propiedades organolépticas del alimento y su degradación por descomposición térmica, oxidación o pardeamiento enzimático. Se ha comprobado que efectuando un tratamiento de deshidratación osmótica (OD) previo al proceso de secado térmico se reduce el daño de las propiedades texturales, estructurales y sensoriales del alimento y se disminuyen los costos energéticos.

A pesar de la gran producción de frutas tropicales, sólo se comercializan cantidades limitadas debido a que los métodos de conservación (refrigeración, congelación, secado) resultan muy caros y demandan mucha energía. Los métodos tradicionales de secado mejoran la estabilidad durante el almacenamiento, pero generalmente provocan pérdidas de componentes relacionados con el sabor y color de los alimentos. En este sentido, la deshidratación osmótica (DO) es una técnica valiosa que puede ser aplicada separadamente o como una etapa importante en la elaboración de productos a través de la Tecnología de Métodos Combinados o de obstáculos (“Hurdle Technology”), pues reduce la actividad de agua para niveles que, combinado uno o más obstáculos, aumenta la estabilidad del producto.

La DO es un proceso que permite la obtención de productos mínimamente procesados y se basa en los flujos osmóticos que se establecen al introducir un alimento en una solución concentrada (solución osmótica) perdiendo agua como consecuencia entre las diferencias de presiones de la solución osmótica y la fracción líquida del alimento. En consecuencia de los gradientes de concentración, ocurren dos flujos principales, en contra-corriente: flujo de agua de la fruta para la solución, y de soluto en el sentido opuesto.

A pesar de sus ventajas, la OD aún tiene restricciones para su implementación a nivel industrial tanto en el diseño de los equipos como de los procesos. Estas restricciones están relacionadas principalmente con la falta de modelos predictivos de cinéticas de pérdida de humedad y ganancia de sólidos que permitan relacionar con precisión las características de los productos deshidratados con las de la materia prima y las

variables del proceso.

El interés en estudiar las cinéticas globales de la DO estriba en la posibilidad de obtener información respecto al efecto de las variables involucradas en el proceso de DO, tales como temperatura, concentración de la solución osmótica, tipo de soluto (sacarosa, sal, etc.), dimensiones del fruto y tiempo de exposición, principalmente. En tal sentido, el estudio cinético tanto de la pérdida de agua como de la ganancia de sólidos reviste importancia para la exploración predictiva de condiciones experimentadas, con el objeto de optimizar los fenómenos de transferencia de masa y reducir el costo del proceso.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Estudiar el efecto de la temperatura de proceso, concentración de la disolución y tipo de agente osmótico usado, en la cinética de transferencia de masa de papaya (*Carica papaya*) deshidratado osmóticamente.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Determinar y evaluar los parámetros cinéticos del proceso (pérdida de agua, ganancia de soluto y pérdida de masa) durante la deshidratación osmótica.
- Evaluar la cinética de deshidratación en función del tiempo para cada interacción de las variables de proceso a distintos niveles.
- Determinar el modelo matemático de transferencia de masa para la deshidratación osmótica de papaya.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

2.1. Frutas tropicales y papaya

2.1.1. Frutas tropicales

Las frutas tropicales y subtropicales, consideradas exóticas, son de gran interés comercial. En los últimos años se ha incrementado el número de frutas tropicales en los mercados de Europa y América del Norte. En la medida que la familiaridad con los nuevos aromas y sabores se incrementa, la demanda de estas frutas aumentará en el futuro tanto para consumo fresco, como para procesado (Pino, 1997). Son consideradas frutas tropicales de consumo fresco las piñas, melones, aguacates, sandías, guayabas, mangos, mangostanes y papayas. Cada vez estas frutas se conocen más en Europa y las demandas aumentan por ser un producto no tradicional, gustativo y de buena calidad (Infoagro, 2002). Las mayores pérdidas en la producción hortofrutícola ocurren en la etapa poscosecha, donde los productos son manejados y almacenados en condiciones poco adecuadas que generan daños irreversibles a su calidad sensorial provocando alteraciones en su composición química. Un problema adicional durante la poscosecha es la manifestación de daños por plagas en los frutos y el posible riesgo para la salud del consumidor (Díaz, 1990).



Figura 2.1: Frutas Tropicales .

2.1.2. La papaya

La papaya cuyo nombre científico es *Carica papaya*, pertenece a la familia de las Caricáceas, nativa de Centroamérica, posiblemente entre el sur de México y el norte de Nicaragua. La primera mención escrita que se tiene de la papaya es en la "Historia Natural y General de las Indias" de Oviedo, quien alrededor del año 1535 en una carta a su Soberano, le decía haberla visto creciendo en dicha región (Barreiro, 1999).

En los primeros tiempos de la conquista se distribuyó rápidamente por todas las Antillas y Sudamérica (Mendoza, 2005). La papaya se conoce con diferentes nombres, como papaw (Inglaterra), mamao (Brazil), lechoso (Venezuela) y fruta bomba (Cuba), (Desai y Wagh, 1995). Actualmente se produce a lo largo de todos los países tropicales, los 10 países que encabezan la lista de exportadores en el mundo son: Brasil, México, Indonesia, India, Zaire, Las Filipinas, China, Perú, Colombia y Mozambique. Además tenemos a Hawai que forma parte del territorio americano, que es un enorme productor y sule en parte la demanda de este país. (Perfetti, 2000).

Es un fruto de alta oferta y demanda masiva tanto a nivel nacional como internacional. Teniendo en cuenta las nuevas tendencias de consumo y comercio de alimentos y la alta producción de esta, se hace evidente la necesidad de desarrollar nuevas alternativas de uso y diversificación de los productos a ofrecer en el mercado.

Dentro de las variedades existentes de papayo en nuestro Departamento tenemos a la variedad de pauna y criolla como las más predominantes.

2.1.2.1. Descripción botánica

Carica papaya es una planta herbácea arborescente, de rápido crecimiento, cuyo tallo es recto y cilíndrico que puede alcanzar en la madurez alturas de 10 m, generalmente es un tallo único; sin embargo, ramifica cuando se elimina el punto apical o cuando las plantas llegan a la vejez. El tronco está compuesto de un tejido más carnoso que leñoso, el cual se va endureciendo conforme va creciendo, una de las manifestaciones son las cicatrices que van dejando los pecíolos al desprenderse (Guzmán, 1998). Las hojas son alternas y aglomeradas en el ápice del tronco y ramas, de pecíolo largo, lisas, más o menos palmeadas, con venas medias robustas; por arriba la hoja es de color verde oscuro o verde-amarillo, brillante, marcada por nervaduras de color blanco amarillento y las venas reticuladas (Osche *et al.*, 1980).



Figura 2.2: Invernadero de papaya (*Carica papaya*)

Las flores son grandes, blancas de 5 pétalos y 5 sépalos. Nacen en el tallo cerca de la inserción de las hojas en el mismo. Pueden ser de sexo masculino, sin ovario desarrollado; femenino, sin estambres (figura 2.3); y hermafroditas, con estambres y ovarios. El sexo de las flores determina el de las plantas y en consecuencia la producción y características de los frutos (Pestano, 2001).

Las plantas femeninas generalmente producen frutos grandes de forma ovoide que tienen carne relativamente delgada, de buena calidad y textura; las plantas bisexuales producen frutos más pequeños de forma elipsoidal o cilíndrica, con carne más gruesa de calidad ligeramente inferior y las plantas masculinas producen pocos frutos y pequeños, por lo general mal formados y sin valor (Osche *et al.*, 1980).

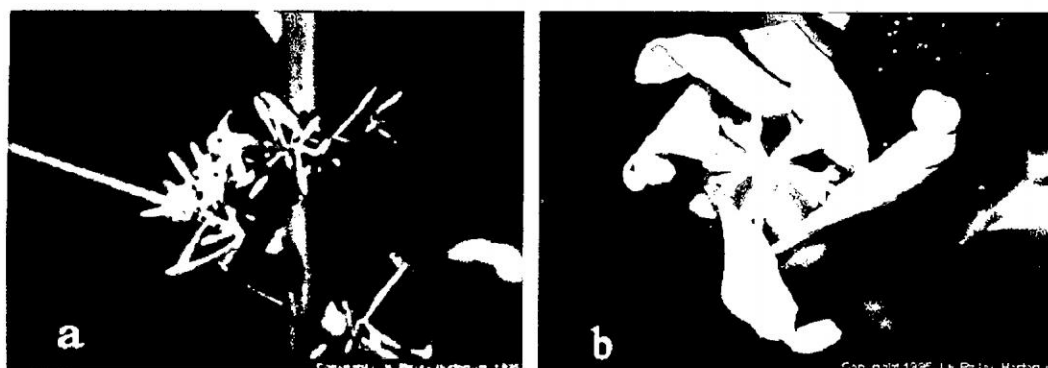


Figura 2.3: Flor masculina (a) y femenina (b) de planta de papaya

Tabla 2.1: Situación botánica de la papaya

Reino	<i>Vegetal</i>
Subreino	<i>Embroyonta</i>
Clase	<i>Magnoliophita</i>
Subclase	<i>Dillenidae</i>
2º Grupo Evolutivo	<i>Diapetala</i>
Orden	<i>Pariales</i>
Familia	<i>Caricaceae</i>
Género	<i>Carica</i>
Especie	<i>Papaya</i>

2.1.2.2. Desarrollo del fruto

El fruto de la papaya (Figura 2.4) es una baya proveniente de un ovario súpero, de pericarpio carnoso y succulento, cuyo color puede variar desde el amarillo hasta rojo. (Guzmán, 1998). Los frutos pueden ser de diferentes formas y tamaños, desde casi esféricos o redondeados, cilíndricos o alargados y con pesos que oscilan entre los 200g y 8000g (Pestano, 2001).

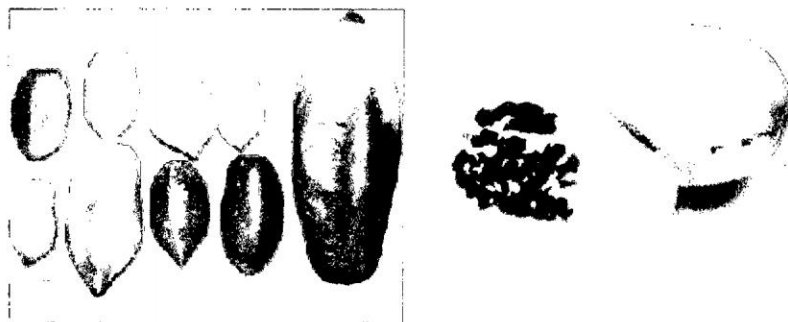


Figura 2.4: Frutos de la papaya

Los frutos maduran entre 4 y 6 meses dependiendo del clima y del cultivo. Durante el desarrollo, la relación pulpa:piel se incrementa en 1.5-2.5 meses, luego avanza de forma constante hasta la maduración y declina al final de este período. El estado de madurez está caracterizado por el cambio de color de la piel. Durante este período ocurren cambios importantes, el contenido de agua varía de 87 a 97 % y los hidratos de carbono aumentan de 2 a 12 %. El contenido de materia seca se incrementa cerca del 7 % 15 días después de la antesis hasta 13 % en la cosecha (Kalra *et al.*, 1995). También ocurre una disminución constante de alcoholes, sólidos insolubles, almidón y muchos minerales, pero se incrementan los azúcares totales. Los ácidos no volátiles y los ácidos orgánicos, como el ácido cítrico y el ácido málico, disminuyen en contenido hasta un mínimo a final del período de madurez (Perfetti, 2000).

2.1.2.3. Composición

El gusto por la papaya está relacionado con el color de la pulpa, sabor, succulencia y aroma característico. El fruto de la papaya tiene un importante valor alimenticio. La composición típica de la papaya se muestra en la tabla 2.2. 100g de pulpa contiene entre 2000 a 3000 unidades de vitamina A y 33 a 55 mg de vitamina C, y cantidades variables de vitamina B (Aguirre y Fernández, 1996).

El contenido de azúcares en la papaya varía considerablemente, dependiendo de la variedad y de las condiciones de cultivo. La composición de azúcares en papaya madura es de 48.3 % de sacarosa, 29.8 % de glucosa y 21.9 % de fructosa (Kalra *et al.*, 1995). El pH de la pulpa de papaya se encuentra entre 5.5 y 5.9. Contiene unos 106 compuestos

volátiles. El linalol, es el compuesto mayoritario y es causante del olor característico de la papaya fresca. Otro gran componente es el benzil isotiocianato que tiene un leve sabor pungente. Otros compuestos off-flavor que se encontraron en el papaya se identificaron como ácidos butírico, hexanoico y octanoico, así como sus correspondientes esteres metílicos. Otros autores reportan la presencia de 18 compuestos mas, de los cuales se encontró que el butanoato de metilo, es el responsable de olores suaves en algunas papayas.

La papaya contiene muchas enzimas, las cuales tienen gran importancia en la calidad y estabilidad de los productos procesados de papaya. Estas enzimas incluyen a la papaína, invertasa, estearasa, poligalacturonasa, miorinasa y la ácido fosfatasa (Kalra *et al.*, 1995).

Tabla 2.2: Composición en fresco del fruto de la papaya (Contenido en 100 g de porción comestible), según manual el cultivo del papayo en el Perú (1996)

PROPIEDAD	Papaya Perú	Papaya Colombia	Papaya Bolivia	Papaya México	Papaya Ecuador
Humedad %	89.30	90.00	85.86	88.80	87.93
Proteína %	0.40	0.50	0.48	0.60	0.50
Grasa %	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Cenizas %	0.50	0.50	0.74	0.60	0.52
Carbohidratos %	9.80	8.90	12.82	9.90	6.20
Potasio mg.				257.00	
Calcio mg.	23.00	25.00	24.00	24.00	22.00
Fósforo mg.	10.00	12.00	21.00	5.00	15.00
Hierro mg.	0.30	0.40	0.60	0.10	0.40
Vitamina A mg.	74.00	700.00	86.00	21.00	95.00
Beta Caroteno mg.	0.41	595.00			
Tiamina mg.	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
Riboflavina mg.	0.07	0.02	0.04	0.03	0.04
Niacina mg.	0.41	0.03	0.30	0.03	0.34
Vitamina C mg.	47.70	75.00	56.00	62.00	58.00

En general, el color de la pulpa de la papaya se debe a la presencia de carotenoides; el color de la papaya roja, a diferencia de la amarilla, se debe al contenido de licopenos que no están presentes en esta última. Por el contrario, el color de la papaya amarilla

se debe mayoritariamente al contenido en criptoxantinas.

Entre los terpenoides carotenoides característicos de la papaya se encuentran la violaxantina y la caricaxantina (Bioextracto, 2003).

Tabla 2.3: Composición de los carotenos responsables del color en papaya fresca

Carotenos de la papaya	Papaya amarilla	Papaya roja
Beta-caroteno	4.8	4.8
Gamma-caroteno	24.8	5.9
Criptoxantina-monoepóxida	15.6	4.4
Criptoxantina	39.9	19.2
Licopeno	0.0	63.5

2.1.2.4. Maduración recolección y conservación del fruto

El estado de recolección se alcanza cuando los frutos empiezan a ablandarse y a perder el color verde del ápice. La madurez se alcanzará a los 4 o 5 días de la recolección y los frutos tomarán un color amarillo (Infoagro, 2002). Si la fruta va destinada a mercados alejados, se debe cosechar cuando empieza a amarillear, mientras que si va destinada al consumo en mercados locales, puede dejarse en el árbol 2-3 días más. Para recoger el fruto se corta el pedúnculo con una navaja afilada y se coloca en recipientes acolchonados, en una sola capa, para evitar que se golpeen o machaquen (Kalra *et al.*, 1995).

Debido a su piel delgada, se trata de frutos muy delicados por lo que se magullan fácilmente. Por ello se deben envolver individualmente y empacarse acolchado por todos los lados para su transporte y comercialización. (Infoagro, 2002).

Los frutos recogidos cuando comienzan a amarillear desarrollan un buen sabor conservándolas a temperaturas tropicales. Conservándolos a 10-12°C se prolonga su vida pero no alcanzarán su sabor característico. Los frutos mantenidos a una temperatura igual o por debajo de 7,2°C se observa una inapropiada madurez, porque el enfriamiento ha determinado algún cambio, que interfiere el proceso normal de maduración del fruto (Desai y Wagh, 1995).

Además el frío no sólo afecta al desarrollo interno de las papayas, sino que también produce pardeamiento de la piel y una pérdida de acidez de la pulpa. Este fenómeno, conocido como “daño por frío” (chilling injury). Puede ser explicado por una disminución en la síntesis de algunos compuestos de importancia para el fruto o por un aumento en la producción de sustancias tóxicas (Lobo, 1995). Los daños causados por el frío pueden hacer que la papaya no madure de forma adecuada, que no se desarrolle color en la pulpa y piel, se acumule agua en los tejidos, persista el color verde en la piel, se desarrolle tejidos suaves y acuosos con picaduras, se haga más susceptible al ataque de hongos...(Lobo, 1995).

2.1.2.5. Tratamientos post-cosecha

Las papayas que no puedan consumirse o procesarse inmediatamente, se almacenan a 10 -13^o C durante 10-15 días. Sin embargo, muchos frutos pueden perderse debido a algún deterioro post-cosecha. Distintos autores han investigado el método más aconsejable para evitar estas pérdidas. Así, los autores Akarnine y Arisurni (1953), citado por Lobo (1995) trataban las papayas, introduciéndolas en agua caliente a 49^oC durante 20 minutos para controlar enfermedades fungosas, seguido de un baño de agua fría para bajarles la temperatura, que ayuda a prolongar brevemente el período de almacenamiento. Couey y Farias (1979), citado por Lobo (1995), además del tratamiento con agua caliente realizaba un recubrimiento con una cera que contenía algún producto de acción fungicida.

Asimismo, se ha ensayado la conservación en atmósferas controladas (CA). De Arriola y col. (1980), citado por Lobo (1995) concluyen que su utilización conlleva un aumento en el coste del producto, pero no necesariamente implica una mayor calidad de la fruta.

El almacenamiento a presión sub atmosférica (20 mm Hg, 10^oC. y 90-98 % de humedad relativa) en contenedores hipobáricos durante los 18-21 días de embarque, inhiben la maduración y el desarrollo de enfermedades (Guzmán, 1998).

La irradiación gamma (75 Krad) puede ser suficiente para desinfectar estos pro-

ductos y, por tanto, aumentar su tiempo de almacenamiento al retrasar el proceso de maduración. Clarke (1971), citado por Lobo (1995), llevaron a cabo el estudio de algunos constituyentes como los azúcares totales, proteínas, lípidos, vitaminas y elementos traza, en papayas sometidas y no sometidas a radiación, no observando diferencias entre ambas.

2.1.2.6. Utilización de la planta de papaya

El fruto de la papaya se consume principalmente como fruta fresca y también se utiliza como materia prima para la obtención de la enzima proteolítica papaína, similar en su acción a la pepsina y tripsina, con numerosas aplicaciones en la industria de la alimentación, cosmética y farmacopea.

Los frutos también pueden emplearse en la elaboración de purés, néctares, mermeladas, fruta deshidratada, fruta cristalizada, alimentos infantiles, conservas en almíbar y otros, además no debe dejarse de lado la opción de consumirlo verde, en picadillos, como si se tratara de una hortaliza, incluso las semillas han sido utilizadas como especia (Guzmán, 1998).

La papaya contiene látex que exuda al ser sesgado o puncionado el epitelio, este látex contiene en mayor concentración a la papaína. En Panamá utilizan el látex de las hojas para eliminar verrugas. Dentro de los diversos usos que se le ha dado a la papaya, también destaca el uso de las semillas en India como desparasitante y antipirético, además se utilizaban infusiones de flores frescas para combatir la tos y contra el impetigo. Las hojas y la corteza se usaban para remover manchas o colorantes. En México suele utilizarse con frecuencia una pasta hecha con las semillas para ablandar carne (Bioextracto, 2003).

2.2. Frutas mínimamente procesadas

La demanda de frutas y vegetales mínimamente procesados es cada vez mayor en el mercado actual. Tan solo en Europa occidental, en el sector de productos vegetales frescos, las FMP cuenta con un crecimiento del 10 % al 25 % desde 1990 (Ragaert, *et al.*,

2004). En Estados Unidos, se ha reportado un crecimiento del 12 % para los vegetales MP y 15 % para las frutas MP. La motivación que encuentra el consumidor en éste tipo de productos es la facilidad para el consumo directo, y la rapidez en la preparación de platos cuando las FMP son empleadas como materia prima. (Ragaert *et al.*, 2004).

Las frutas refrigeradas mínimamente procesadas (FMP) son productos que contienen tejidos vivos o que han sido modificados ligeramente de su estado en fresco, siendo en su naturaleza y calidad semejantes a los frescos. Los tejidos de esos productos no exhiben las mismas respuestas fisiológicas que los tejidos vivos intactos de los productos vegetales sin tratar. El propósito de las FMP es proporcionar al consumidor un producto frutícola muy parecido al fresco con una vida útil prolongada y al mismo tiempo, garantizar la seguridad de los mismos, manteniendo una sólida calidad nutritiva y sensorial (Shafiur, 2003).

Las FMP constituyen dentro de los alimentos una clase que se está desarrollando de forma rápida e importante. Estos alimentos de conveniencia se están produciendo con la única aplicación de las ciencias básicas y la ciencia de los alimentos junto con el apoyo de las tecnologías y de la ingeniería.

Este tipo de productos está listo para su consumo en fresco, son estables y contienen características muy similares al producto original, permaneciendo vivos después del procesado. Generalmente han sufrido exclusivamente tratamientos físicos simples de preparación y para su conservación y distribución se someten únicamente a refrigeración Carlin *et al.*, 1990 citado por Ceballos (2005). Wiley (1997a) definió a los productos hortofrutícolas mínimamente procesados como aquellos alimentos a los que se les ha modificado solo ligeramente su apariencia original, mostrando un aspecto fresco tanto en sus características como en su calidad, y que mantienen tejidos vivos, aunque éstos no presentan las mismas respuestas fisiológicas que los vivos sin tratar, debido a las operaciones sufridas (calor, radiación, aplicación de conservadores, entre otros). La preparación de los productos vegetales procesados en fresco se basa en la aplicación de tratamientos simples o combinados que protejan con eficiencia al material vegetal frente a las alteraciones de tipo físico o mecánico (deshidratación, golpes, magulladuras,

entre otros), microbiológicas (ocasionadas por hongos, levaduras y bacterias) bioquímicas (pardeamiento enzimático, oxidaciones de lípidos, alteraciones de aroma, sabor y textura) y nutricionales (como la pérdida de vitaminas) (Artés *et al.*, 1999; Artés y Artés, 2000). Este tipo de productos ha recibido numerosas denominaciones, según los países y el modo de preparación. En países francófonos se les llaman productos cuarta gama (4ème Game) y en países anglosajones se les denominan productos mínimamente procesados (minimally processed; slightly processed o partially processed) o listos para su consumo (ready to eat o ready to use) o recién cortados (fresh-cut).

Debido a los diferentes conceptos que engloba el sector de los productos vegetales con mínimos procesos, es importante asumir un concepto de producto hortofrutícola que involucre los parámetros de calidad óptimos para lograr los beneficios esperados por parte del consumidor y del ente industrial, es así como definiremos a las frutas mínimamente procesadas (FMP) como productos listos para comer parcialmente preparados, que se caracterizan por presentar una fácil e inmediata utilización, estar libres de defectos, poseer un estado de madurez óptimo y unas características muy similares a la materia fresca. Este tipo de productos proporciona a los consumidores, la posibilidad de comprar pequeñas porciones de fruta de alta calidad y, a los productores, una apertura en los canales de comercialización.

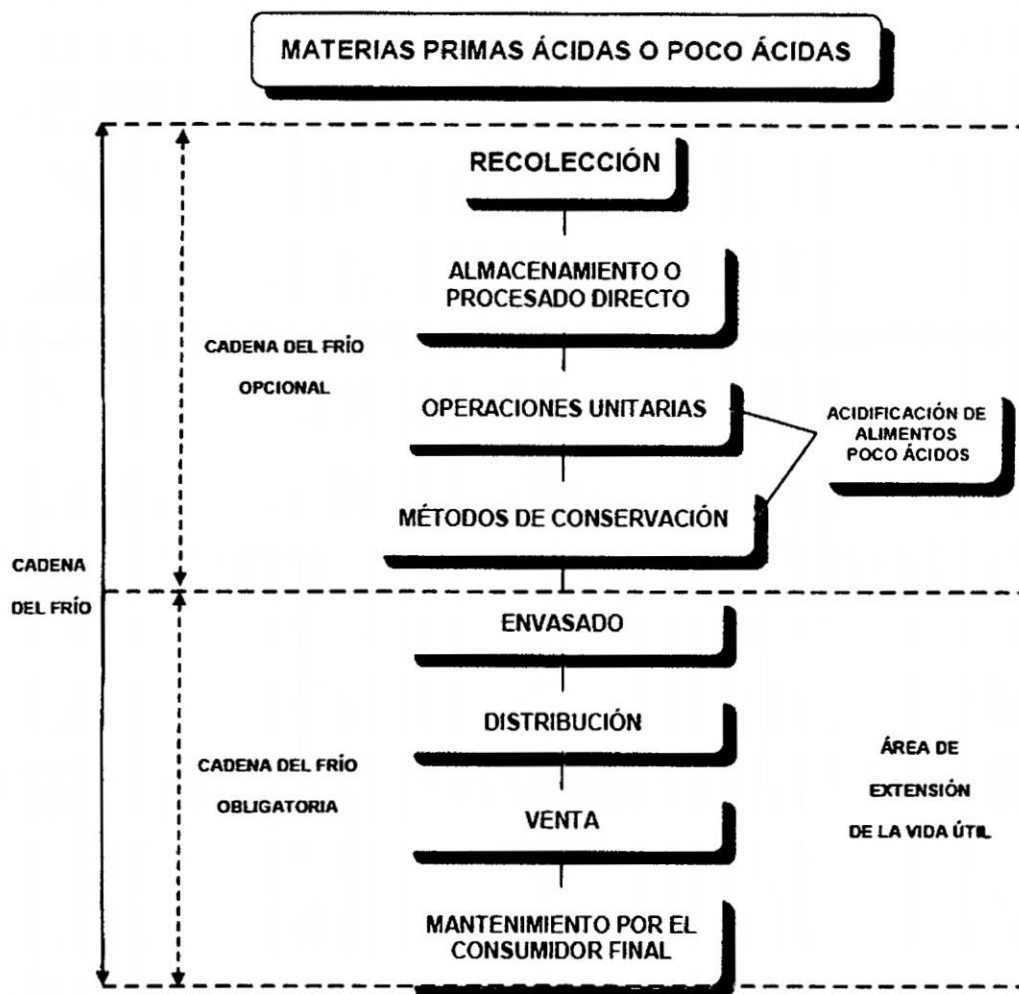


Figura 2.5: Diagrama de flujo de las operaciones más comunes en el procesamiento de FMP (Wiley, 1997b)

2.2.1. Factores que influyen en la calidad de las frutas mínimamente procesadas

El objetivo primordial de los alimentos vegetales mínimamente procesados es proporcionar al consumidor un producto fresco, con una vida útil prolongada y al mismo tiempo garantizar la inocuidad de los mismo, manteniendo una alta calidad nutritiva y sensorial. De acuerdo con Bett (2000) la capacidad de desarrollo del sector de las frutas mínimamente procesadas, se puede decir que está limitada por factores intrínsecos y extrínsecos. Los factores intrínsecos son relativamente complejos, ya que engloban los cambios fisiológicos y bioquímicos que acompañan al procesado y almacenamiento de

los productos que se elaboran. Dentro de éstos, destacan primeramente la actividad respiratoria, posteriormente se destaca el crecimiento de microorganismos, los cuales encuentran como medio óptimo aquellos en los que el pH se aproxima a la neutralidad, aunque hay algunos que pueden crecer a valores de pH cercanos a 4.5 o superiores (Ragaert *et al.*, 2004). Las frutas en general poseen un pH de 4.0 o inferior (dependiendo de la especie y el grado de madurez) lo cual inhibe la proliferación de la mayoría de bacterias, pero otros microorganismos como los géneros fúngicos y bacterias acidófilas podrían proliferar en estos medios.

Por último, hay que destacar la importancia de la actividad del agua, ya que si es muy elevada (entre 0.95 y 1) facilita el crecimiento de los microorganismos y dificulta la difusión de gases de los tejidos vegetales, con el riesgo de generarse procesos fermentativos y producción de etanol y acetaldehído los cuales alteran el aroma y el sabor (Artés, 2000). Los factores extrínsecos hacen referencia a diferentes controles de procesado como es la aplicación del código alimentario, en cuanto a buenas prácticas de manufactura y/o higiene, con algunas especificaciones. El desafío de las empresas productoras de FMP es considerablemente alto debido a la necesidad de mantener las frutas cortadas con una apariencia, textura, sabor y valor nutritivo semejante al de las frutas que no han sido procesadas. Así, para poder mantener la calidad de los productos y extender su vida útil, la industria y el sector científico están poniendo a punto nuevas técnicas de procesado, la mayoría basada en la aplicación de métodos combinados, junto con el desarrollo de nuevos materiales de envasado y sistemas de control. Todo ello ha permitido llegar a soluciones óptimas desde el punto de vista de la calidad.

2.2.2. Influencia del procesado en la calidad de frutas mínimamente procesadas

A pesar de que los productos hortofrutícolas mínimamente procesados adquieren un rápido protagonismo en los supermercados y puntos de venta por la comodidad de uso y por su apariencia de fresca y naturalidad, se trata de productos generalmente más perecederos que el material original del que provienen. Es importante considerar

que gran parte de las técnicas de conservación de alimentos estabilizan el producto y alargan su vida útil. Sin embargo, en las FMP, aumenta significativamente su carácter perecedero (Shafiur, 2003; Cantwell, 1992). Esto es debido a que las frutas y hortalizas mínimamente procesadas continúan siendo órganos vivos, y por consiguiente, cualquier operación durante su elaboración produce un impacto fisiológico, tanto más grande cuanto mayor es el grado de procesado, aumentando su velocidad de deterioro y reduciendo su periodo de vida útil con respecto al producto del cual proviene. Los daños en el tejido, ocasionadas por las simples operaciones de corte o pelado, estimula la actividad respiratoria, lo que induce la biosíntesis de enzimas asociadas a un incremento en la velocidad de los procesos metabólicos y de otras reacciones bioquímicas responsables del cambio de color, aroma, textura y valor nutritivo que conducen a la senescencia de los tejidos vegetales (Cantwell, 1992). El corte de los tejidos vegetales provoca también la descompartimentación celular, lo cual permite el contacto de las enzimas de localización citoplasmática con los substratos de localización vacuolar. Igualmente se produce una fuerte pérdida de jugos celulares, incrementando la actividad de agua y el área de superficie por unidad de volumen. Esto puede acelerar la pérdida de agua y, además, el exudado constituye un medio muy favorable para el desarrollo de microorganismos (Figura 2.6) (Izumi *et al.*, 1996; Carlin *et al.*, 1990 citado por Ceballos, 2005). Además, las operaciones de preparación de FMP incrementan la contaminación microbiológica por transferir la microflora de la piel y de los utensilios utilizados a los tejidos del fruto, disminuyendo la estabilidad del mismo (Cantwell, 1992).

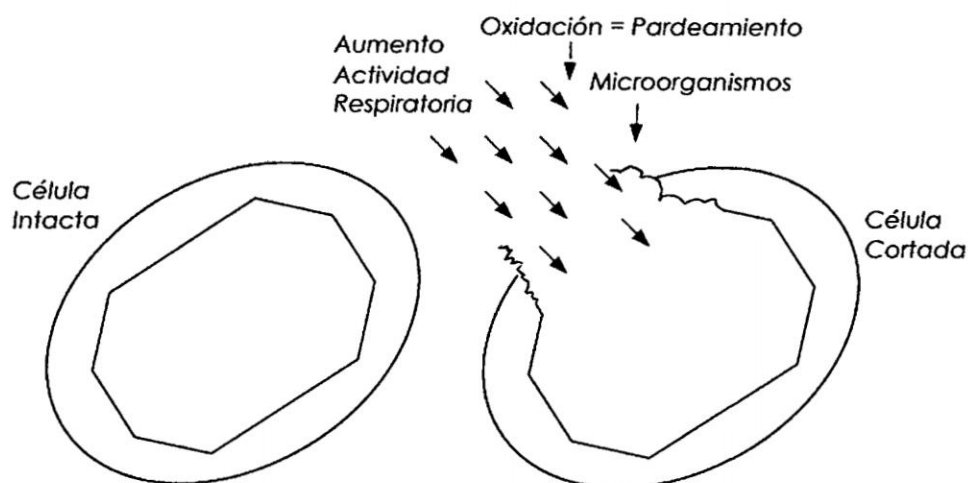


Figura 2.6: Daño a nivel celular originado por la operación de corte (Adaptado de Wiley, 1994)

Otro factor que está estrechamente ligado a los mínimos tratamientos, es el deterioro de los productos FMP causado por la liberación de las enzimas endógenas las cuales continúan actuando en los frutos procesados y almacenados (Artés, 2000). Estos cambios fisiológicos generalmente están acompañados por pérdidas de sabor y aroma, decoloración de superficies, pérdidas de color, deterioro en el tejido, incremento en la velocidad de pérdida de vitaminas, ablandamiento del tejido y pérdidas de la turgencia y volumen, lo cual conduce a una vida útil muy corta.

2.2.3. Distribución y utilización de frutas y hortalizas mínimamente procesadas

La distribución, en general, puede definirse como el traslado y manipulación rápida y eficaz de las frutas y hortalizas desde el lugar del cultivo hasta el punto de consumo.

La distribución y utilización de las FMP incluyen las operaciones siguientes (Wiley, 1997a):

- *Operaciones en los centros de producción: almacenamiento y control de fruta y hortaliza fresca y procesada, operaciones de procesado central.*
- *Distribución física: transporte en la ciudad y entre ciudades.*

- *Operaciones en los centros de consumo: centros de distribución, venta al por mayor, venta al por menor y establecimientos de comida.*
- *Red de comunicaciones: Las comunicaciones proporcionan intercambio de información entre los usuarios de los canales de distribución. Para cualquier actividad relacionada directa o indirectamente con la producción, procesado y consumo de alimentos MP es esencial disponer de una información precisa y actualizada sobre abastecimiento, demanda y precios.*

Los sistemas de distribución de FMP buscan rentabilizar el tiempo y el espacio o valor económico de los productos, consiguiendo y disponiendo los alimentos en el lugar que son requeridos en el tiempo que se desea y a un coste razonable. Los canales exactos de comercialización difieren de un producto a otro y además va cambiando a lo largo de los años.

2.2.4. Métodos de conservación

De acuerdo con Shafiur (2003) el objetivo fundamental de la conservación es proporcionar seguridad, mantener la calidad así como prolongar la vida útil y prevenir la alteración de los productos.

Los principales métodos de conservación en FMP son los siguientes:

- *Conservación por calor*
- *Conservación química*
- *Conservación con atmósferas modificadas*
- *Conservación por frío*
- *Conservación por irradiación*
- *Reducción de la a_w (Deshidratación por Aire caliente, Microondas, Liofilización, Osmótica y combinación de las anteriores)*

Éste último ejemplo, la reducción de la actividad de agua (a_w), está directamente relacionado con la eliminación del agua, o la indisponibilidad de la misma mediante agentes que forman complejos con el agua (azúcares y/o sales), propiciando un medio de mayor dificultad para el crecimiento de los microorganismos patógenos o alteradores. Según Jay (1986), citado por Ceballos (2005) la a_w mínima aproximada para el crecimiento de los principales grupos alterantes de microorganismos es de: 0.9 para la mayoría de las bacterias; 0.88 para la mayoría de las levaduras y de 0.80 para la mayoría de los mohos. Muchas de las frutas y hortalizas tienen una a_w de 0.98 o superior y en consecuencia son muy sensibles a la reducción de la a_w como medio de control de los microorganismos y de la actividad enzimática.

La deshidratación es una de las técnicas más antiguas de conservación de los alimentos y, al mismo tiempo, de las más actuales, ya que juega un papel importante en la actividad industrial de transformación y conservación de los mismos (Earle, 1988). El principal objetivo de la deshidratación de alimentos es extender su vida útil mediante una disminución del contenido de humedad, reduciendo así la actividad del agua y en consecuencia ralentizando el crecimiento microbiano y la actividad enzimática, factores que provocan el deterioro de los alimentos (Fellows, 1988).

2.3. Deshidratación osmótica

En los últimos años se han desarrollado técnicas de conservación de frutas con altas actividades de agua (0.95 - 0.98), donde el objetivo principal es disminuir la actividad de agua (a_w) a un valor crítico, donde los microorganismos y las enzimas no pueden actuar (Shafiur, 2003 y Ponting, 1973). Uno de los fundamentos más utilizados en dichas técnicas es la reducción de la actividad de agua de forma controlada, mediante la aplicación de deshidratación osmótica (Fito y Chiralt, 1997). La utilización de éste método en la conservación de alimentos, resulta de mucha importancia en frutas y hortalizas, sobre todo en aquellas que poseen un tiempo de cosecha corto y que son perecederas, permitiendo la reducción de costes en la exportación de dichos productos. Además con la deshidratación de un producto alimenticio se consigue un incremento

de las posibilidades de conservación y una reducción de peso, lo que reduce los costes de almacenamiento y transporte (Sharma *et al.*, 2003; Shafiur, 2003).

La deshidratación osmótica es una técnica ampliamente utilizada para la obtención de alimentos parcialmente deshidratados y como etapa previa al secado convencional y/o congelación de frutas y hortalizas (Chiralt *et al.*, 2001; Moraga *et al.*, 2006). El consumidor espera de los productos de fruta pelados y cortados que se sirven en el mercado que se encuentren en óptimas condiciones de frescura y que su apariencia en cuanto a textura, color y sabor sea lo más similar posible al producto fresco. En este sentido, la deshidratación osmótica se presenta como una técnica que disminuye los cambios no deseados que se pueden producir con otro tipo de secado. Entre las principales ventajas se encuentra el uso de bajas temperaturas, por lo que la eliminación del agua se realiza sin cambio de estado minimizándose el daño en el color, sabor y textura del producto (Moreno, 1999; Moraga *et al.*, 2000). Además, esta técnica potencia la biosíntesis de componentes clave del aroma de frutas como la fresa (Escriche *et al.*, 2000; Talens *et al.*, 2002), la piña (Pino *et al.*, 1999) y el kiwi (Bereiter, 2001). Esto, junto con la reducción de la acidez y el aumento en la concentración de solutos (azúcares), puede contribuir a mejorar el sabor de frutas ácidas y/o amargas como el pomelo. Por otro lado, la formación de una capa compacta de células deshidratadas en la superficie, podrían actuar como barrera protectora del resto del tejido conservando las características del producto fresco (Moraga *et al.*, 2006).

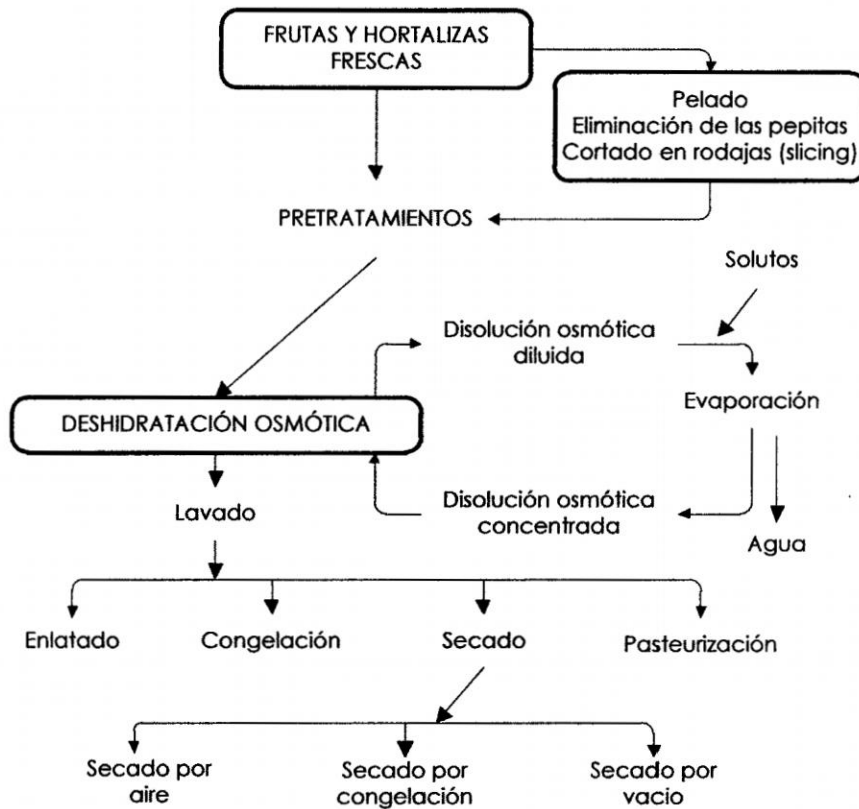


Figura 2.7: Pasos principales en el procesamiento de productos deshidratados osmóticamente

La deshidratación osmótica (DO) consiste en sumergir al producto sólido, en piezas o entero, en una solución hipertónica, de menor a_w , la cual suele ser una disolución azucarada en el caso de la deshidratación de frutas (Barbosa-Cánovas y Vega Mercado, 2000). Éste es un proceso de remoción de agua en el que materiales celulares (como vegetales) son colocados en una solución concentrada que contiene uno o más solutos disueltos. La deshidratación se debe a que ocurre un proceso de ósmosis entre el alimento y la solución concentrada, provocando al menos dos flujos principales simultáneos en contracorriente: un importante flujo de agua del alimento hacia la disolución y una transferencia de solutos desde la disolución hacia el alimento, los cuales son debidos a los gradientes de concentración de agua y solutos, a un lado y otro de las membranas que forman el tejido parenquimático del producto (Torreggiani, 1993; Argai, 1988). En este proceso el agua se difunde desde una región de alta concentración hasta una región de concentración más baja, a través de una membrana semipermeable hasta alcanzar

el equilibrio. La pared celular compleja de la estructura del alimento actúa como una membrana semipermeable, la cual no es completamente selectiva, resultando dos flujos de transferencia de masa: la difusión de agua del alimento a la solución y la difusión del soluto de la solución al alimento (Rastogi y Raghavarao, 1990), el agua puede pasar libremente a través de la membrana celular, mientras que otros componentes de la disolución lo harán mucho más lentamente (Torreggiani, 1993). Si se tienen membranas de este tipo se puede observar que las moléculas que no penetran al interior del tejido forman una capa de soluto concentrado en la superficie de un espesor aproximado de 3 mm (Raoult-Wack *et al.*, 1991), la cual puede promover la remoción de agua y regular su impregnación.

El flujo de componentes de una fase a otra ocurre de forma espontánea hasta alcanzar la igualdad de potenciales químicos de los diferentes componentes en el sistema. De esta forma se consigue el principal objetivo de cualquier técnica de deshidratación, extender la vida útil del producto mediante una disminución del contenido de humedad, reduciendo así la actividad del agua y como consecuencia el crecimiento microbiano y la actividad enzimática, factores que provocan el deterioro de los alimentos (Fellows, 1988).

La transferencia de solutos intracelulares está muy impedida al comienzo del proceso por la permeabilidad de las membranas, al igual que la de los solutos de la OS (disolución osmótica) que penetrarán principalmente por capilaridad en los poros (espacios intercelulares del tejido) y en cierta medida por difusión a través de la fase líquida intercelular del tejido. Pero, dado que la mayor parte de la fracción líquida en frutas está compartimentada por membranas de permeabilidad selectiva al agua, la vía predominante para alcanzar el equilibrio composicional será la pérdida de agua intracelular por vía osmótica (Barat *et al.*, 1998). Se ha comprobado que la velocidad a la que sale el agua del alimento hacia la disolución concentrada es mayor que la de entrada de los sólidos solubles hacia el interior del alimento (Lenart y Lewicki, 1990; Ayala, 2001), por lo que la presión osmótica de la disolución será, por tanto, la fuerza impulsora predominante hacia el equilibrio al comienzo del proceso. Además se considera que

después de un cierto tiempo de tratamiento osmótico, que depende mayoritariamente de las condiciones del proceso, la permeabilidad selectiva de la membrana es destruida y el soluto puede entonces penetrar por difusión. En algunos trabajos se ha visto que en el caso del mango, después de 60 min de tratamiento, el diámetro de los poros del tejido celular se reduce drásticamente, con lo cual, se ve reducida la movilidad de moléculas relativamente grandes como es el caso de la sacarosa (Ayala, 2001).

Dichas transferencias de masa van acompañadas de una salida de sustancias hidrosolubles propias de la fruta (azúcares, ácidos orgánicos, minerales, vitaminas, etc.) a la disolución osmótica (Vial *et al.*, 1991; Peiró *et al.*, 2006), que por lo general, no se toman en cuenta por ser cuantitativamente despreciables, aunque pueden ser esenciales en lo que a la calidad organoléptica se refiere (Barat *et al.*, 1998). Desde ese punto de vista, el enriquecimiento de la disolución osmótica en estos compuestos de alto valor nutricional, hace que sea interesante su aprovechamiento para la formulación de otros productos derivados, como productos gelificados a base de fruta.

Debido a que el mecanismo osmótico puede tener actuación en intervalos de temperaturas moderadas en los cuales el tejido vegetal se encuentra vivo, su aplicación puede considerarse como procesado mínimo de frutas (Tabla 2.4). El producto, en este caso frutas pueden llegar a perder agua sin ningún cambio de fase, lo que implica, en el caso de los sistemas biológicos, una preservación de las estructuras celulares (Shafiur, 2003). Además, ofrece la posibilidad de introducir la cantidad deseada de un soluto adecuado, por ejemplo, solutos de interés sensorial, como los antipardeantes o sales de calcio.

2.3.1. Fundamentos de la deshidratación osmótica

El fenómeno osmótico tiene lugar como consecuencia, de la diferencia de potencial químico entre el alimento y la solución osmótica (el potencial químico del agua de una solución azucarada es menor que el potencial químico del agua pura) (Barbosa-Canóvas y Vega-Mercado, 2000). La magnitud de la presión osmótica establecida al poner en contacto estas dos soluciones con diferente concentración a través de una membrana semipermeable, es función de la concentración de solutos, a ambos lados de

Tabla 2.4: Criterios para una definición práctica de los procesos osmóticos en base a su duración (Adaptado de Lazarides et al., 1999)

Proceso osmótico	Escala de Tiempo	Operaciones	Usos o aplicación	Mecanismos de control
Procesos de tiempos muy cortos	Minutos	Impregnación a vacío y/o pre-concentración osmótica	Productos minimamente procesados o pre-tratados	Mecanismo hidrodinámico, pseudodifusional y deformación de la matriz
Procesos de tiempos cortos	Horas			
Procesos de tiempos largos	Horas/días	Deshidratación osmótica	Productos deshidratados osmoticamente estables	Relajación de la matriz celular
Procesos de tiempos muy largos	Días / Semanas		Productos deshidratados osmoticamente muy estables	Sustitución total/parcial de gas por disolución osmótica de los poros

la membrana. El agua fluirá desde el alimento hacia el medio osmótico más concentrado y podrán ocurrir flujos de soluto (agente osmótico) desde la disolución osmótica al producto, y solutos no compartimentados propios del alimento como azúcares, ácidos, minerales, entre otros hacia el medio osmótico (Figura 2.8).

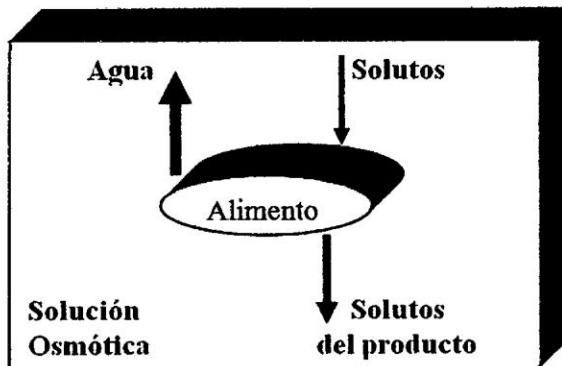


Figura 2.8: Esquema de la transferencia de masa durante el proceso de deshidratación osmótica. Modificado de Guilbert *et al.*, 1996

La fuerza impulsora para la transferencia de masa está relacionada con la actividad de agua del alimento y de la solución de la siguiente manera (Raoult-Wack *et al.*, 1991):

$$u = u^o RT \ln a_w$$

Donde:

u : Potencial químico

u^o : Potencial químico en n estado de referencia

R : Constante de los gases

T : Temperatura

a_w : Actividad de agua

El proceso de ósmosis llega a su término hasta que los potenciales químicos del alimento y de la solución lleguen al equilibrio (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 1996). De este modo se puede observar que la actividad de agua de la solución osmótica debe de ser menor a la del alimento para que se pueda llevar a cabo el proceso.

2.3.2. Cinética de la deshidratación osmótica

Los factores más importantes que se tienen en cuenta al analizar la cinética de la DO y que influyen a la hora de su modelización son: las características de la materia prima (estructura, composición y tamaño de piezas del producto), la concentración y naturaleza del agente osmótico, la temperatura y la presión de trabajo.

La modelización de esta operación está limitada por la dificultad de considerar la influencia particular de la estructura de cada tejido y los mecanismos activos y pasivos de transporte en la velocidad de transporte de agua y solutos.

En la estructura celular, durante la deshidratación osmótica, se producen unos cambios (alteración de las paredes celulares, desgarramiento de la lámina media, lisis de membranas (plasmalema y tonoplasto), pérdida de volumen del tejido, etc.) que provocan una gran alteración en la compartimentación celular, de modo que estas modificaciones de la matriz extracelular y la membrana plasmática afectarán en gran medida a las propiedades de transporte durante el tratamiento (Nieto *et al.*, 2004). Varios trabajos (Alzamora *et al.*, 1997; Martínez-Monzó *et al.*, 1998a; Barat *et al.*, 1998, 1999; Fito *et al.*, 2000; Barrera *et al.*, 2004) han contribuido a esclarecer el papel de la estructura, y sus cambios a lo largo del proceso, en las velocidades de transporte y cinética del mismo. No obstante, la complejidad y diversidad de los tejidos (en estructura y fisiología) hace que haya todavía muchos aspectos oscuros.

Los enfoques utilizados hasta ahora para caracterizar los fenómenos de transporte simultáneos que se verifican en el proceso de deshidratación osmótica se han basado, en primer lugar, en la microestructura del alimento, enfoque mediante el cual la transferencia de agua se aproxima a un mecanismo de transporte transmembrana (a través de la membrana) y que se realiza en base a principios termodinámicos. Un segundo enfoque ha sido sustentado en la segunda ley de Fick, que incorpora los términos de coeficientes de difusividad tanto para la pérdida de agua como para la ganancia de sólidos. Por último, algunos trabajos han constituido un tercer enfoque basado en las manifestaciones macroscópicas de los fenómenos de transporte, lo que ha sido de utilidad en la modelización empírica del proceso osmótico (Panagiotou *et al.*, 1998; Fito *et al.*, 2001) y que permite prefijar tiempos de proceso en función del nivel de concentración deseado para el producto.

En condiciones con cambios de presión o de baja presión se potencian los mecanismos hidrodinámicos y la capilaridad, mientras que a presión atmosférica se solapan básicamente fenómenos de ósmosis y difusión. Además, si se aplica un pulso de vacío al principio del tratamiento, restituyendo después la presión atmosférica, la entrada de fase líquida externa en los espacios intercelulares puede jugar un papel importante en la transferencia de materia global.

La cinética de la deshidratación osmótica, con frecuencia ha sido analizada en términos de velocidades de pérdida de agua, ganancia de sólidos y de pérdida de peso del alimento (Pointing *et al.*, 1966; Garrote y Bertone, 1989). Se ha propuesto un modelo (Fito y Chiralt, 2001; Barat *et al.*, 1998) que contempla la cinética de los cambios de composición del producto a lo largo del proceso desde dos puntos de vista: Por un lado los cambios de composición de la fase líquida del producto (agua más sólidos solubles), que determinan la calidad del producto y su estabilidad; y por otro lado, la cinética de pérdida de peso, asociada con la pérdida de agua y ganancia de solutos, que determina la rentabilidad del proceso.

Usualmente la deshidratación osmótica no es aconsejable para obtener unas reducciones del contenido en agua superiores al 50 % a causa de la pequeña velocidad de los

fenómenos de transferencia a estos niveles de concentración. Normalmente, las velocidades de flujo de agua son altas durante las primeras 2 horas y la mayor cantidad de sólidos ganados ocurre dentro de los primeros 30 minutos de tratamiento; a partir de ese punto los flujos se hacen muy lentos (Conway *et al.*, 1983; Giangiacoimo *et al.*, 1987). La velocidad de transferencia de masa de sustancias hidrosolubles nativas (azúcares, ácidos orgánicos, minerales, sales, etc.) que atraviesan la membrana, es muy pequeña y cuantitativamente despreciable (Conway *et al.*, 1983).

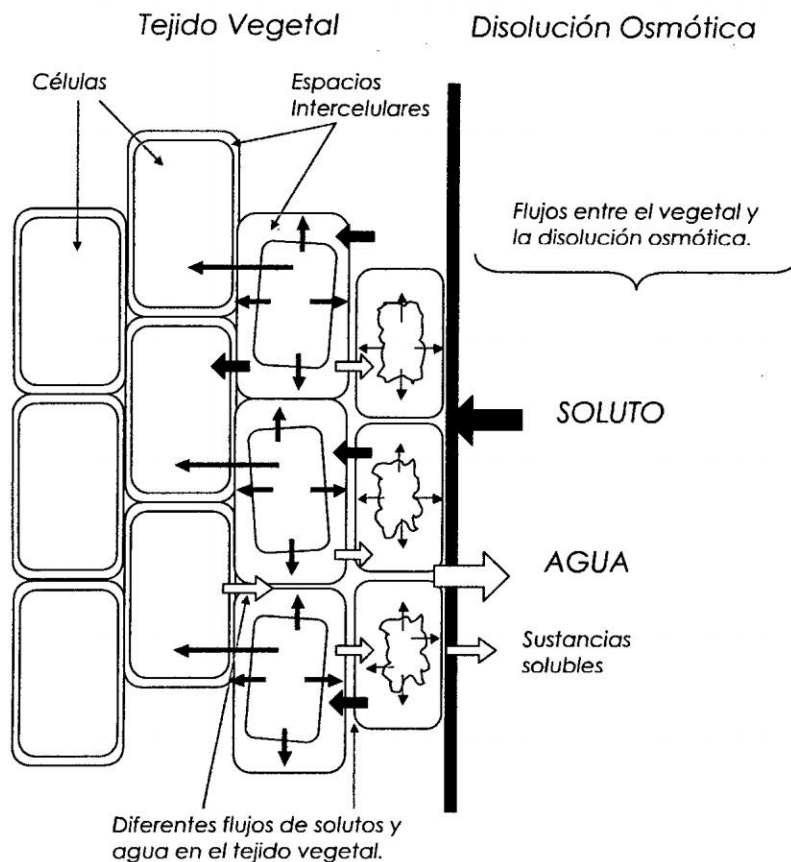


Figura 2.9: Esquema de las diferentes rutas de transporte durante la deshidratación osmótica de tejidos vegetales (Adaptado de Spiazzi y Mascheroni, 1997)

2.3.3. Variables que afectan el proceso de deshidratación osmótica

Existen diversas variables que influyen en el proceso de deshidratación osmótica de alimentos, de cuyo efecto genérico depende el estado final del producto deshidratado.

Estas variables se pueden comprender en dos grupos; las que hacen referencia a las características intrínsecas del producto que se va a deshidratar (tamaño, forma, estado de madurez...) y las relacionadas con las variables del proceso (composición y concentración de la disolución osmótica, temperatura aplicada durante el tratamiento, tiempo de proceso, presión de trabajo, etc., (Barat *et al.*, 1998).

La variación de las condiciones que se dan en el proceso puede causar una modificación en la eficacia del mismo. Los factores más importantes que se tienen en cuenta al analizar la cinética de la deshidratación osmótica son:

2.3.3.1. Estructura y composición del fruto, y tamaño de las piezas

Durante la transferencia de agua/soluto(s) que ocurre en el proceso de OD, un factor determinante es la naturaleza, la estructura y/o geometría del tejido a deshidratar que está dada por la especie, la variedad y el estado de madurez. La amplia variación de la física natural de la fruta afecta al comportamiento osmótico y al estado final de los productos deshidratados osmóticamente (Pointing, 1973; Islam y Flink, 1982; Sharma *et al.*, 2003). La gran variabilidad observada entre las diferentes frutas está en su mayor parte relacionada con la diferente compactación del tejido (Giangiacomo *et al.*, 1987), el contenido inicial de sólidos solubles e insolubles (Lenart y Flink, 1984), tamaño y distribución de los espacios intercelulares, la presencia de gas, la relación entre las diferentes fracciones pécticas (pectina soluble en agua y protopectina) (Forni *et al.*, 1986), el nivel de gelificación de pectina (Moy *et al.*, 1978) y la actividad enzimática de la fruta (Giangiacomo *et al.*, 1987). Se ha observado que diferencias en la estructura de la materia prima, especialmente porosidad, afectan a los mecanismos de transporte implicados en la deshidratación osmótica (Fito *et al.*, 1994; Lazarides, 1998; Chiralt *et al.*, 1999), de forma que cuanto mayor es la porosidad de la fruta mayor es la ganancia de sólidos.

La geometría y tamaño del producto, relacionados con la superficie específica, es otra de las variables importantes a controlar, ya que, grandes superficies específicas favorecen la pérdida de agua y la ganancia de sólidos (Lerici *et al.*, 1989; Torreggiani, 1993). A

mayor superficie disponible para la OD, más eficaz será el proceso. Las geometrías que ofrecen una mayor relación superficie/volumen son las más comúnmente utilizadas (cubos, cilindros y esferas).

2.3.3.2. Naturaleza del agente osmótico

La naturaleza del agente osmótico es fundamental para definir el comportamiento del producto durante los procesos osmóticos de deshidratación. Se han utilizado, en diferentes trabajos, gran variedad de agentes osmóticos, principalmente azúcares, como sacarosa, maltosa, glucosa, fructosa, lactosa, maltodextrinas, y trealosa entre otros o mezclas de ellos. El impacto de los diferentes solutos en la cinética de deshidratación en función de la concentración utilizada ha sido objeto de estudio de varios autores (Le Maguer, 1988; Cháfer *et al.*, 2001). En función de su naturaleza y propiedades físicas (viscosidad, poder depresor de la a_w , etc), se observará un comportamiento u otro, ya que la interacción de los solutos con el agua y la matriz sólida del alimento será distinta (Cháfer *et al.*, 2001). Por otra parte, el tamaño de la molécula de soluto va a suponer una mayor o menor facilidad para difundir en la estructura compleja de los distintos productos. De los agentes osmóticos anteriormente mencionados, el más utilizado para la deshidratación de frutas es la sacarosa (Barat *et al.*, 2001) debido a su fácil accesibilidad y aceptable sabor, y por reducir el pardeamiento enzimático (Conway *et al.*, 1983, Giraldo *et al.*, 2003). Un estudio realizado por Bolin *et al.*, (1983) utilizando diferentes disoluciones demostró que, la apreciación sensorial de catadores prefirió la sacarosa como agente osmótico.

2.3.3.3. Concentración del agente osmótico

La concentración de la disolución osmótica exterior afecta en el sentido de definir la fuerza impulsora en cuanto a la transferencia de materia se refiere, así como a la viscosidad de la disolución, y de la fase líquida del alimento que va aumentando su viscosidad a medida que se concentra, hasta alcanzar la de la disolución osmótica en el equilibrio (Barbosa-Canóvas y Vega-Mercado, 2000; Cháfer *et al.*, 2001). De igual

forma, la distinta viscosidad de la disolución, y de la fase líquida del alimento que va aumentando con el tiempo del proceso tiene un efecto importante en la velocidad del transporte (Cháfer *et al.*, 2001; Barat *et al.*, 2001).

El uso de disoluciones de diferente concentración da lugar al desarrollo de diferentes perfiles de concentración en el tejido de las frutas (Sharma *et al.*, 2003). Diversas experiencias muestran que a altas concentraciones de disolución osmótica se produce una mayor pérdida de agua en el fruto (Lenart y Flink, 1984). Estas altas concentraciones producen grandes fuerzas impulsoras, con ello los tiempos de proceso son más cortos (se acelera la pérdida de agua y la ganancia de solutos) y las células superficiales de la muestra se deshidratan en gran proporción con respecto a las demás capas internas de células del tejido permanecen prácticamente sin alteración. Por el contrario, en condiciones más suaves, una parte mayor del tejido queda afectada pero en menor intensidad (Lerici *et al.*, 1989). El nivel de afectación de las diferentes capas celulares estará asociado con su muerte o con un estrés más o menos intenso, el cual se verá reflejado en los procesos fisiológicos, pudiéndose desarrollar metabolitos, especialmente durante el almacenamiento, que podrían afectar la calidad del producto.

2.3.3.4. Temperatura de tratamiento

Varios autores han observado que la velocidad del proceso osmótico se ve significativamente afectada por el aumento de la temperatura (Lenart y Flink, 1984; Conway *et al.*, 1983). Un incremento en la temperatura del proceso puede provocar un aumento de la velocidad de transferencia de materia, tanto en lo que se refiere a la salida de agua como a la entrada de sólidos solubles (Lazarides, 1998). No obstante, la influencia de la temperatura no es uniforme en cualquier intervalo. Temperaturas comprendidas entre 20 y 40 °C son consideradas como las más óptimas porque no afectan la integridad de los tejidos, preservan la calidad nutricional del producto y son las de mayor interés a nivel económico (Sharma *et al.*, 2003). Por debajo de 40-50 °C las membranas celulares mantienen su funcionalidad limitando el transporte. Por encima de estas temperaturas la desnaturalización y la pérdida de la actividad biológica celular hacen el transporte

mucho más rápido, pero tiene un efecto negativo sobre la estructura del tejido de la fruta y por tanto sobre su textura, así como sobre el sabor y el aroma (Lazarides, 1998; Barat *et al.*, 2001). Shafiur, (2003) afirma que el empleo de bajas temperaturas y elevadas concentraciones osmóticas favorece la retención de ácidos orgánicos y nutrientes. No obstante, en la mayoría de los casos se observa una escasa ganancia de azúcar, debido a la formación de una capa externa de células colapsada, que actúa como barrera impidiendo el flujo de componentes (Lazarides *et al.*, 1998). En este sentido el uso de altas temperaturas solo es indicado cuando se desea obtener productos con un alto contenido en sólidos solubles (Barbosa-Canóvas y Vega-Mercado, 2000).

2.3.3.5. Presión de trabajo

Durante el proceso de deshidratación osmótica, la presión de trabajo puede desempeñar un papel muy importante influyendo directamente en la cinética de transporte de materia del mismo. Es importante señalar que la relevancia de esta variable va ligada a la porosidad del producto a deshidratar. En los últimos años, numerosos trabajos se han centrado en analizar y comparar los resultados obtenidos de la deshidratación osmótica en frutas, con el intento de mejorar la calidad de los productos deshidratados, trabajando en condiciones de presión atmosférica (OD) y de vacío (VOD). Cuando se trabaja en condiciones de vacío, se observan cinéticas de transferencia de masa más rápidas debidas a la actuación del mecanismo hidrodinámico (descrito en el apartado 5 de este mismo capítulo), que aumenta la superficie de contacto de la fruta con la fase líquida externa (Lerici *et al.*, 1989; Barat *et al.*, 2001). El problema que presenta el empleo de ésta técnica es el aumento del costo del equipo. Sin embargo, si se tiene en cuenta que el mecanismo hidrodinámico (HDM) es muy rápido y sucede cuando se rompe el vacío del sistema, se puede aplicar la técnica de deshidratación osmótica por pulsos de vacío (P/VÓD) que permite rentabilizar el uso del tanque de vacío, al utilizarlo solo el primer período corto del proceso (Fito *et al.*, 1994).

2.3.3.6. Efecto de la agitación del sistema

La agitación periódica al sistema también produce un importante aumento en la velocidad de deshidratación. A medida que avanza el tiempo de contacto de la fruta con el jarabe, ésta se va rodeando de la propia agua que lixivia, la cual se va difundiendo lentamente por el jarabe concentrado. Al estar la fruta rodeada de agua, la diferencia de concentraciones entre el jarabe y la pared celular se hace menor, con lo que también se disminuye la velocidad de salida de agua (Le Maguer, 1997).

Si el sistema es agitado, el agua que ha salido es retirada del contacto de la pared de la fruta y será reemplazada por jarabe concentrado que permitirá el nuevo establecimiento de una alta diferencia de concentración, además del aumento de la velocidad de deshidratación.

De igual forma se ha detectado un menor ingreso de soluto del jarabe al interior de la fruta si se mantiene la agitación. Esto se podría explicar por la dificultad que produce el flujo de agua que sale de la fruta a las moléculas de soluto que traten de ingresar, es decir el soluto iría en contra de la corriente del agua de la fruta (Torreggiani, 1993).

2.3.4. Mecanismos de transporte durante la deshidratación osmótica

Los mecanismos del transporte de masa en el interior del tejido vegetal, sometido a tratamiento osmótico, pueden ser de tres tipos (Le Maguer, 1997):

Transporte apoplástico (AP), ocurre en el exterior de la membrana celular y puede visualizarse como una difusión de moléculas en la pared celular y los espacios intercelulares.

Transporte simplástico (SP), se realiza en el interior del plasmalema y se caracteriza por el movimiento de moléculas de una célula a otra a través de delgados conductos (plasmodesmos).

Transporte transmembrana (TM), tiene lugar a través del mecanismo osmótico, es un intercambio entre el protoplasma y el espacio libre que comprende el espacio intercelular y la pared celular (Le Maguer, 1998).

A efectos prácticos, se puede considerar que la estructura de las células parenquimáticas consta de un espacio intracelular conformado por la vacuola y el citoplasma, un espacio extracelular constituido por la pared celular y los espacios intercelulares, delimitados por la membrana plasmática ubicada entre los espacios intracelulares y los extracelulares. La fruta es un agregado de células parenquimáticas empaquetadas de forma compacta con cierta cantidad de espacios intercelulares libres (Torreggiani, 1993).

El comportamiento del tejido vegetal es igual al de una sola célula. La velocidad de encogimiento o hinchamiento del tejido durante la OD dependerá tanto de la difusión extracelular como de la permeabilidad de la membrana celular, sin embargo, si se tiene en cuenta la interacción entre células, el cambio en el medio circundante repercutirá en las primeras capas de células, de esta forma, las más cercanas a la interfase estarán completamente plasmolizadas, mientras que aquellas más alejadas permanecerán completamente turgentes (Figura 2.10) (Le Maguer, 1997; Conway *et al.*, 1983).

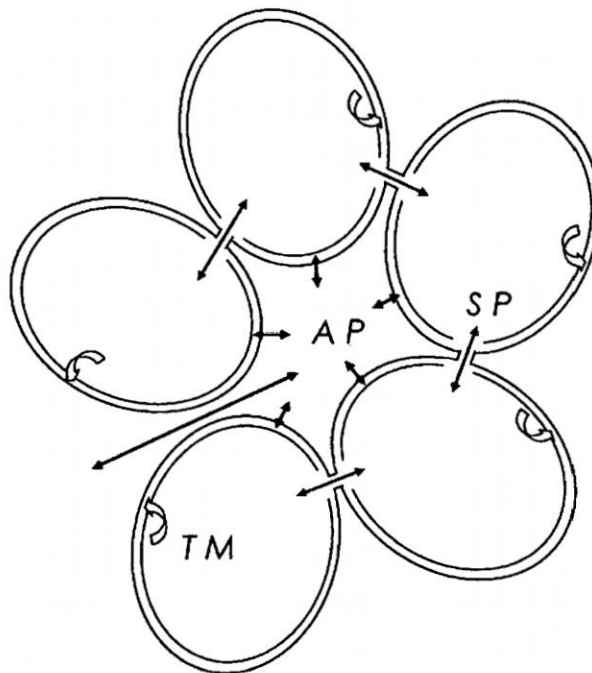


Figura 2.10: Tipos de transporte en el tejido vegetal: Apoplástico (AP), simplástico (SP) y transmembrana (TM). (Adaptado de Albors, 2002)

Algunos autores han demostrado que la membrana es parcialmente selectiva y algo

del soluto puede atravesar la misma (Lerici *et al.*, 1989; Barat *et al.*, 2001). Esto se debe a que la membrana y la pared celular en los productos vegetales, son unidades biológicas vivas que pueden encogerse o estirarse bajo la influencia del crecimiento o de la turgencia generada dentro de la célula (Bolin *et al.*, 1983).

Se considera que la acumulación del soluto está aparentemente limitada a la periferia del alimento. Por su parte Le Maguer (1997) encontró en el mango deshidratado osmóticamente que la sacarosa se localiza entre la pared y la membrana celular. Una elevada concentración en solutos puede provocar la ruptura de la estructura celular y alterar el comportamiento en lo que respecta a la ganancia de sólidos y pérdidas de agua. En el caso de no producirse cambios en la estructura, se produce una mayor deshidratación y encogimiento de la célula, que también puede modificar significativamente la estructura y obstaculizar los fenómenos de transporte (Lenart & Flink, 1984).

Alzamora, et al., (1997) han descrito que, entre las mayores alteraciones que produce la DO sobre la estructura celular, destacan:

- *El colapsamiento de la matriz porosa*
- *La modificación de la pared celular*
- *La pérdida de la funcionalidad de la membrana plasmática*
- *La incapacidad del protoplasma para recuperar su volumen original*
- *El encogimiento del tejido, etc.*

Los mecanismos que actúan en la DO se pueden dividir en dos grupos según:

1. El conjunto de mecanismos dependientes de gradientes de concentración (denominados de forma genérica pseudodifusionales) incluyen los mecanismos osmótico y fickiano. Comprenden el transporte transmembrana (a través de la membrana) y el difusional en los espacios no compartimentados. En el proceso de DO es el mecanismo de transporte predominante (Fito *et al.*, 1994).
2. El Mecanismo Hidrodinámico (HDM); dependiente de gradientes de presión y/o temperatura y que incluye los efectos capilares y que está sumamente influen-

ciado por la estructura. Éstos se dan en los espacios intercelulares o poros del tejido, generados por los cambios estructurales volumétricos (Fito *et al.*, 1994). Los fenómenos capilares se incentivan cuando la presión del sistema es baja.

2.3.5. Aplicaciones de la deshidratación osmótica

Son varias las aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica de alimentos. Algunas de ellas se aplican ya de una forma generalizada, aunque se conocen con otro nombre, como es el caso del salado de alimentos. Sin embargo, existen otras posibles aplicaciones del proceso cuya viabilidad y modelización se está investigando actualmente.

En estudios realizados sobre la deshidratación osmótica de alimentos, se citan ventajas de ésta sobre los tratamientos tradicionales de secado por aire caliente, secado solar, etc, entre las cuales, se concretan algunas:

- Debido a que la ósmosis puede realizarse a bajas temperaturas, el daño en color y sabor en los alimentos se ve minimizado (Ponting *et al.*, 1973).
- Productos como las frutas, prolongan su periodo de almacenamiento, manteniendo a la vez el color, el sabor y la textura si se someten a deshidratación osmótica como pretratamiento en los procesos de conservación por congelación (Lerici *et al.*, 1989; Sharma *et al.*, 2003), secado por aire caliente (Ponting *et al.*, 1973), métodos combinados aire caliente y microondas (Giraldo, 2003), liofilización (Lerici *et al.*, 1989), pasteurización (Torreggiani *et al.*, 1987).
- La alta concentración de soluto alrededor de la pieza previene el oscurecimiento, evitando así el uso de aditivos químicos como los sulfitos (Ponting *et al.*, 1973).
- El incremento de la relación azúcar/acidez mejora el sabor, sobretodo en productos como las frutas (Ponting *et al.*, 1973).
- La estructura de los alimentos se conserva mejor debido a que la eliminación del agua se realiza sin cambio de estado (Shafiur, 2003; Lenart y Flink, 1984).

- El proceso de deshidratación osmótica protege de la pérdida de ciertos nutrientes hidrosolubles, como es el caso de la vitamina C en las frutas (Barat *et al.*, 2001; Chiralt *et al.*, 1999).
- Cuando el alimento es sometido a una deshidratación osmótica previa al secado, es posible la reducción del tiempo del mismo, lo cual permite una reducción en los costos de producción (Lerici *et al.*, 1989).
- La baja actividad de agua, principalmente en las superficies de los productos deshidratados osmóticamente, hace posible, en algunos casos y bajo condiciones de operación específicas, la inhibición del crecimiento microbiano (Fellows, 1988; Pointing *et al.*, 1973).

Además de su utilización como pretratamiento, la deshidratación osmótica tiene otras aplicaciones como la elaboración de alimentos de humedad intermedia, alimentos auto-conservables, productos semiconfitados y productos semielaborados, presentando una excelente posibilidad para la exportación y aprovechamiento de frutas tropicales (Barat *et al.*, 2001).

El uso de la deshidratación osmótica (DO) durante tiempos cortos de procesado y temperaturas moderadas para la obtención de FMP es una práctica usual descrita por diversos autores (Ponting *et al.*, 1973; Alzamora *et al.*, 1997; Fito *et al.*, 1994). La reducción conveniente de la a_w a valores entre 0.97 - 0.90, manteniendo el producto con alta humedad (65-85%), y la modificación de la estructura de los tejidos (Figura 2.11) implican cambios en la velocidad de las reacciones bioquímicas y fisicoquímicas, así como en los fenómenos de transferencia de materia durante el procesado de los mismos. En la mayoría de los casos, la técnica de DO a temperaturas moderadas se combina con el empleo de agentes acidulantes, conservantes, antipardeantes etc., en las soluciones osmóticas para conseguir los resultados deseados.

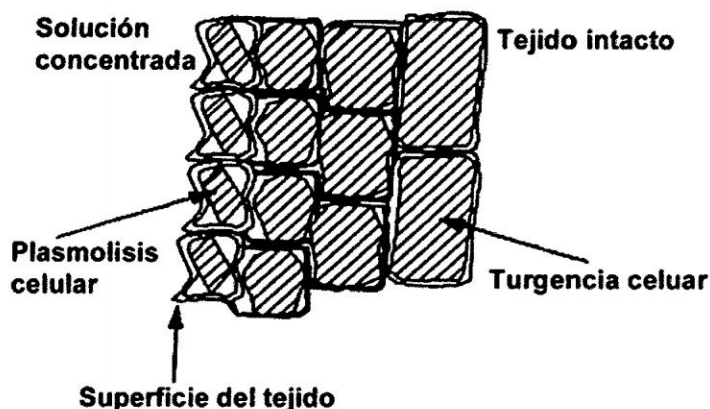


Figura 2.11: Evolución del tejido vegetal durante el contacto con la solución concentrada (Adaptado de Le Maguer, 1997)

2.3.6. Ventajas de la deshidratación osmótica

Algunas ventajas de la deshidratación osmótica son:

- Lograr un producto de mejor color, textura y sabor que en el secado térmico (Azuara *et al.*, 2002; Parjoko *et al.*, 1996).
- Inhibir la transferencia de oxígeno a la fruta por la presencia de azúcar sobre la superficie, reduciendo el pardeamiento enzimático (Saputra, 2001).
- Aumentar la vida útil de los productos y evitar la pérdida de su naturaleza crujiente ya que se reduce la difusividad del agua en el proceso de sorción (Saputra, 2001).
- Retardar la pérdida de volátiles durante el secado térmico (Azuara *et al.*, 2002).
- La OD requiere menor energía que otros tipos de secado, ya que la eliminación del agua se hace sin cambio de fase (Conway *et al.*, 1983, Giraldo *et al.*, 2003).
- Debido a que la velocidad de secado térmico se reduce con muestras previamente sometidas a OD (reducción del coeficiente de difusión por la impregnación del azúcar) (Cháfer *et al.*, 2001), el consumo de energía por kg de agua eliminada se aumenta, sin embargo, los costos globales de energía son menores ya que hay menos agua para eliminar (Lenart y Flink, 1984).

- Aunque se requiere más tiempo para el secado combinado, que para el secado sin OD (Park *et al.*, 2002), se reduce el tiempo de secado a altas temperaturas que afectan al producto (Saputra, 2001).
- Es posible introducir solutos y especies tales como agentes conservantes, nutrientes, saborizantes o mejoradores de textura como componentes activos a través de la disolución osmótica (Lerici *et al.*, 1989).
- Los productos secados por OD adquieren las propiedades mecánicas necesarias (firmeza, dureza) sin cambios sustanciales en la superficie, permitiendo un eficiente post-tratamiento (Giraldo *et al.*, 2003).
- Con la VOD se obtiene mayor velocidad de deshidratación, salida de agua más rápida en la primera media hora y mayor entrada de sólidos solubles (Barat, 1998), además se modifican las propiedades térmicas (conductividad y difusividad) del producto, mejorando la eficiencia de tratamientos térmicos posteriores y la calidad del producto (Shafiur, 2003).

2.4. Difusión y transferencia de masa

2.4.1. Proceso de transferencia de masa

Las operaciones de transferencia de masa se caracterizan por transferir una sustancia a través de otras a escala molecular. La transferencia de masa es un resultado de la diferencia de concentraciones, o gradiente, en donde la sustancia que se difunde abandona un lugar en que está muy concentrada y pasa a un lugar de baja concentración (Treybal, 1988).

La transferencia de masa es decisiva en muchas áreas de la ciencia y la ingeniería. La transferencia de masa se verifica cuando el componente de una mezcla emigra en una misma fase o de una fase a otra, a causa de la diferencia de concentración entre dos puntos. Muchos fenómenos comunes implican una transferencia de masa. El líquido de un recipiente abierto lleno de agua se evapora en el aire estacionario debido a la

diferencia de concentración del vapor de agua entre la superficie del líquido y el aire que lo rodea. Existe una “fuerza impulsora” de la superficie al aire. Un trozo de azúcar sumergido en una taza de café se disuelve y se difunde, sin agitación, en la solución que lo rodea. Cuando la madera verde recién cortada se expone a la acción atmosférica, se seca parcialmente a medida que el agua de la madera se difunde hasta la superficie cortada y después, a la atmósfera circundante. En un proceso de fermentación, los nutrimentos y el oxígeno disueltos en la solución se difunden hacia los microorganismos (Geankoplis, 1998).

La mayoría de las operaciones de transferencia de masa que se utilizan para separar los componentes de una solución, logran hacerlo al poner la solución que va a separarse en contacto con otra fase insoluble. Como se verá, la rapidez con la cual un componente se transfiere de una fase a otra depende de un coeficiente llamado de transferencia de masa, o de rapidez, y del grado de desviación del sistema de equilibrio. La transferencia termina cuando se alcanza el equilibrio (Treybal, 1988).

Ahora bien, los coeficientes de rapidez para los diferentes componentes en una fase dada difieren entre sí en mayor grado bajo condiciones en donde prevalece la molecular, pero aun en este caso la diferencia no es muy grande (Treybal, 1988).

2.4.2. Difusión molecular

Si una solución es completamente uniforme con respecto a la concentración de sus componentes, no ocurre ninguna alteración; en cambio, si no es uniforme, la solución alcanzará espontáneamente uniformidad por difusión, ya que las sustancias se moverán de un punto de elevada a otro de baja concentración. La rapidez con la cual un soluto se mueve en cualquier punto y en cualquier dirección dependerá, por tanto, del gradiente de concentración en ese punto y esa dirección. Para describir cuantitativamente este proceso, se necesita una medida apropiada de la rapidez de transferencia (Treybal, 1988).

La rapidez de transferencia puede describirse adecuadamente en función del flujo molar, o moles/(tiempo)(área), ya que el área se mide en una dirección normal a la

difusión. Sin embargo, aunque una solución no uniforme sólo contenga dos componentes, éstos deberán difundirse, si se quiere alcanzar la uniformidad. Surge entonces la necesidad de utilizar dos fluxes para describir el movimiento de un componente: N, el flux relacionado con un lugar fijo en el espacio, y J, el *flux*¹ de un compuesto con relación a la velocidad molar promedio de todos los componentes (Treybal, 1988).

2.4.2.1. Leyes de la difusión molecular: Leyes de Fick

Primera ley de Fick. Deducida por Fick en 1855, por analogía con la ley de Fourier sobre la conducción de calor, pero con la importante diferencia de que la transferencia de materia, contrariamente al calor, mantiene a todo el fluido en movimiento, excepto en circunstancias especiales en las que los componentes se mueven por igual en todas direcciones (Geankoplis, 1998).

Según Fick, la velocidad de transferencia de materia de un componente en una mezcla de dos componentes A y B, estará determinada por la velocidad de difusión del componente A y el comportamiento del componente B. La velocidad molar de transferencia del componente A por unidad de área debida al movimiento molecular viene dada por la primera ley de Fick, en este caso para la dirección z. El signo negativo hace hincapié que la difusión ocurre en el sentido del decremento en concentración. La difusividad es una característica de un componente y de su entorno (temperatura, presión, concentración ya sea en solución líquida, gaseosa o sólida y la naturaleza de los otros componentes) (Treybal, 1988).

$$J_A = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z} \quad (2.1)$$

Siendo:

J_A : velocidad molar de difusión por unidad de área.

D_{AB} : difusividad del componente A en el componente B.

C_A : concentración molar del componente A.

¹*Flux* indica el flujo de una cantidad por unidad de área; por ejemplo, flux molar [$\text{mol}/(\text{tiempo})(\text{área})$].

Z : distancia en la dirección de la difusión.

De la misma manera, la velocidad de difusión en el componente B viene dada por:

$$J_B = -D_{BA} \frac{\partial C_B}{\partial z} \quad (2.2)$$

Si la presión total, y por tanto, la concentración molar total es constante, los términos $\partial C_A/\partial z$ y $\partial C_B/\partial z$, tienen que ser iguales y de signo contrario, por lo que los componentes A y B se difunden en sentidos contrarios.

En muchos casos, el componente B no permanecerá estacionario ni difundirá con una velocidad molar igual y de sentido contrario a la del componente A, siendo el cálculo, en este caso, difícil (Treybal, 1988).

Segunda ley de Fick. La difusión en régimen permanente es un caso especial de uno de los más generales de la difusión transitoria, en la cual los flujos y la concentración varían con el tiempo. La difusión en régimen no permanente se aplica a muchos métodos experimentales en donde se determina el coeficiente de difusión, y en las teorías de transferencia de masa, así como en la teoría de penetración (Treybal, 1988).

La ecuación diferencial de difusión transitoria ² se obtiene combinando la expresión de la primera ley de Fick con la que ahora veremos (Treybal, 1988).

Para un caso unidimensional, la segunda ley de Fick se obtiene igualando la acumulación del componente A en una porción de líquido de espesor dz en una dirección normal a la dirección de la difusión, al correspondiente cambio en el flujo, dada por la expresión:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \frac{\partial N_A}{\partial z} = 0$$

Siendo la integral de $N_A = \text{constante}$. Esta ecuación, en combinación con la relativa a la primera ley de Fick, expresada por la ecuación $J_A = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z}$, nos da la segunda ley de Fick, se puede demostrar (Crank, 1975) que el transporte de una sustancia en

²*Difusión en estado no estacionario.* La mayoría de las situaciones prácticas de difusión son en estado NO estacionario. El flujo de difusión y el gradiente de difusión varían con el tiempo \rightarrow genera acumulación o agotamiento de las sustancias que difunden.

un sólido es representada por la siguiente ecuación en coordenadas rectangulares:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2.3)$$

D_e es la difusión efectiva de la sustancia a través del sólido, que representa en si el promedio de las variaciones de la difusividad en las tres direcciones coordenadas.

Para el caso de la deshidratación osmótica, C es la concentración de agua o soluto en el sólido, x,y,z son las coordenadas rectangulares espaciales, t es el tiempo del proceso.

Esta ecuación se utiliza, generalmente, para la difusión en sólidos y para la interdifusión equimolar en gases. La solución de esta ecuación para distintas formas geométricas y condiciones límite son dadas por Crank (1975), y por Carslaw y Jaeger (1947), como es el caso de la ecuación de interes para la difusión en una dimensión, en láminas planas semi – infinitas en contacto con una cantidad de solución infinita, considerando régimen transitorio y cortos periodos de tiempo:

$$\frac{M_o^j - M_t^j}{M_o^j - M_\infty^j} = 2(F_o)^{0,5} \left\{ \pi^{-0,5} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \operatorname{ierfc} \frac{n}{F_o} \right\} \quad (2.4)$$

2.5. Mecanismos de transferencia de materia presentes en la deshidratación osmótica

Los mecanismos de transferencia de materia presentes en la deshidratación osmótica que se realiza a presión atmosférica y temperatura ambiente son principalmente por difusión (Leyes de difusión de Fick). Estos mecanismos son originadas por las diferencias de concentración entre el alimento y la solución osmótica. El proceso puede ser entendido como la transferencia (o movimiento individual y desordenado) de moléculas individuales a través de un fluido. La ecuación de la difusión molecular de masa se representa por:

$$J_{AZ} = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial Z}$$

Donde:

J_{AZ} : Es el flujo molar del componente A en la dirección Z causado por la difusión molecular (velocidad del proceso de transferencia),

D_{AB} : Es la difusividad molecular de la molécula A en el solvente B ,

C_A : Es la concentración de A (fuerza impulsora del proceso) y Z es la distancia de difusión (resistencia al proceso de transferencia).

La ley de Fick supone que (figura 2.12):

- Solamente se transfiere un componente A de la mezcla hacia la interfase y el flujo total es el correspondiente a J_{AZ} .
- La difusión de un componente A en una mezcla está equilibrada por un flujo molar igual y de sentido contrario del componente B .

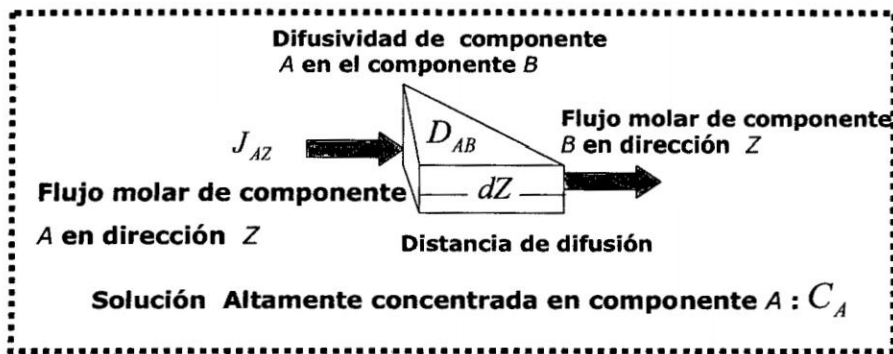


Figura 2.12: Proceso de Transferencia de materia según ley de Fick

2.5.1. Modelo matemático de transferencia de masa en deshidratación osmótica

La transferencia de masa en el proceso de deshidratación osmótica a presión atmosférica se modela fenomenológicamente utilizando generalmente el modelo de Crank (1975), que consiste en una solución de la teoría difusional, la cual se basa en la ecuación de la difusión en sólidos y, en ciertos casos, a la difusión en fluidos (segunda ley

de Fick), donde el flujo de masa es proporcional al gradiente de concentración dentro del sólido (Crank, 1975). Este modelo ha sido empleado por muchos autores ya que es el modelo fenomenológico más conocido para representar el mecanismo difusional (Giraldo *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2002; Parjoko *et al.*, 1996; Azuara *et al.*, 1992).

Crank (1975) propuso una solución analítica para la ley de difusión de Fick para diferentes geometrías, con dicho modelo, se estiman la difusividad efectiva (D_e) del agua y del soluto, simulando los experimentos con condiciones límites y resolviendo las ecuaciones analítica o numéricamente, pero las suposiciones que se hacen no siempre son fáciles de lograr lo que implica grandes limitaciones (Parjoko *et al.*, 1996). Las limitaciones del modelo de difusión de Fick para propósitos prácticos son: (1) se asume un cuerpo semi-infinito por lo tanto la transferencia de masa es unidireccional, (2) se asume que el agente osmótico es un medio semi-infinito, por lo tanto se requiere una relación disolución/alimento muy grande, (3) aunque tiene en cuenta la forma y las dimensiones, sólo hay soluciones analíticas para láminas planas, cilindros, cubos y esferas, entonces se requieren técnicas numéricas para materiales irregulares, (4) el punto de equilibrio tiene que determinarse experimentalmente, (5) se asume que sólo se presenta el mecanismo de difusión para la extracción de agua, (6) no hay efecto de los sólidos ganados ni de los solutos perdidos sobre la pérdida de agua, (7) se desprecia el encogimiento debido a la transferencia de masa y (8) se desprecia la resistencia externa a la transferencia de masa, pero esto no se puede lograr a baja temperatura ni a alta concentración de soluto (Parjoko *et al.*, 1996).

La difusividad efectiva explica al mismo tiempo la variación de las propiedades físicas del tejido y la influencia de las características de la disolución y de las variables de proceso, por lo tanto, observando simplemente la magnitud de D_e no se entiende explícitamente el impacto de los diferentes parámetros sobre el proceso de OD (Yao y Le Maguer, 1997).

Basándose en la segunda ley de Fick, Crank (1975), propuso una ecuación para la difusión en una dimensión, en láminas planas semi – infinitas en contacto con una cantidad de solución infinita, considerando régimen transitorio y cortos periodos de

tiempo:

$$\frac{M_o^j - M_t^j}{M_o^j - M_\infty^j} = 2(F_o)^{0,5} \left\{ \pi^{-0,5} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \text{ierfc} \frac{n}{F_o} \right\} \quad (2.5)$$

Donde el número de Fourier (F_o) está dado por

$$F_o = \frac{D_e^j t}{l^2}$$

Donde:

M_o^j : Masa inicial para un componente del alimento, kg

M_t^j : Masa en un tiempo t para un componente del alimento, kg

M_∞^j : Masa en el equilibrio para un componente del alimento, kg

ierfc : integral de la función de error complementaria

D_e^j : Difusividad efectiva para un componente del alimento, $\frac{m^2}{s}$

t : Tiempo, s

l : Dimensión característica (la mitad del espesor de la lamina), m

El modelo puede simplificarse usando únicamente el primer término de la serie, de acuerdo a la ecuación (2.7), aunque es menos riguroso matemáticamente.

$$\frac{M_o^j - M_t^j}{M_o^j - M_\infty^j} = 2 \left\{ \frac{F_o}{\pi} \right\}^{0,5} \quad (2.6)$$

Obteniendo la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta M_t^j}{\Delta M_\infty^j} = 2 \left\{ \frac{D_e^j t}{l^2 \pi} \right\}^{0,5} \quad (2.7)$$

Donde:

ΔM_t^j : Cantidad de agua perdida o de sólidos solubles ganados por el alimento en el tiempo t

ΔM_∞^j : Cantidad de agua perdida o de sólidos solubles ganados en el equilibrio

Por lo tanto el uso del modelo de Crank se convierte en un procedimiento empírico para ajustar a los datos experimentales y D_e en un parámetro cinético fuertemente dependiente de las condiciones experimentales y del método matemático (Salvatori, 1999; Yao y Le Maguer, 1997).

Azuara (1992) modeló la pérdida de agua y la ganancia de sólidos en la OD (Determinación de los coeficientes de difusividad del agua y solutos) a partir de los balances de masa para predecir la cinética de la deshidratación durante el proceso osmótico y, además, determinar el punto de equilibrio final, usando los datos obtenidos durante un periodo de tiempo relativamente corto.

Balance de masa para el agua

$$\Delta M_t^w = \Delta M_\infty^w - M_m^w \quad (2.8)$$

Donde:

ΔM_t^w : Fracción de agua (g agua / 100g de muestra) perdido por el alimento en el tiempo t

ΔM_∞^w : Fracción de agua (g agua / 100g de muestra) perdido por el alimento en el equilibrio

M_m^w : Fracción de agua que puede difundir del alimento pero aún está en el, al tiempo t

Con:

$$\Delta M_t^w = \frac{(M_o^o X_o^w) - (M_t^o X_t^w)}{M_o^o} \quad (2.9)$$

M_o^o : Masa total inicial

X_o^w : Fracción másica del agua en el alimento, inicialmente

M_t^o : Masa total en un tiempo t

X_t^w : Fracción másica del agua en el alimento, en un tiempo t

El valor de ΔM_∞^w es una constante para determinadas condiciones de temperatura y concentración. Por otro lado ΔM_t^w y M_m^w son una función de la tasa de pérdida de agua y del tiempo. Sin embargo, la ΔM_t^w aumenta con el aumento de la tasa de pérdida de agua y el tiempo; mientras que la M_m^w disminuye. Esto sugiere que hay una relación entre ΔM_t^w y M_m^w , representada por el parámetro K . Este parámetro está, a su vez, en función del tiempo y de la tasa de pérdida de agua:

$$M_m^w = \frac{\Delta M_t^w}{K} \quad (2.10)$$

La tasa de pérdida de agua varía en función del tiempo, la temperatura y la concentración inicial de la solución osmótica. Como los experimentos de deshidratación osmótica se llevan a cabo en una determinada concentración inicial y temperatura constante, se asume que la tasa de pérdida de agua solo estaría en función del tiempo. Basándose en esto, es posible proponer una función simple para K en términos del tiempo (t) y una constante (S_1) relacionada a la pérdida de agua:

$$K = S_1 t \quad (2.11)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.11) y (2.8) en la ecuación (2.10), y reordenando los términos, obtenemos una ecuación que asocia la pérdida de agua ΔM_t^w con el tiempo (t) a través de la constante S_1 y ΔM_∞^w

$$\Delta M_t^w = \frac{S_1 t (\Delta M_\infty^w)}{1 + S_1 t} \quad (2.12)$$

Haciendo un tratamiento similar, se obtiene la expresión para la ganancia de sólidos:

$$\Delta M_t^s = \frac{S_2 t (\Delta M_\infty^s)}{1 + S_2 t} \quad (2.13)$$

Donde:

ΔM_t^s : Fracción de sólidos solubles ganados por el alimento en el tiempo t

ΔM_∞^s : Fracción de sólidos solubles ganados por el alimento en el equilibrio

Con:

$$\Delta M_t^s = \frac{M_t^o (1 - X_t^w) - M_o^o (1 - X_o^w)}{M_o^o} \quad (2.14)$$

S_1 y S_2 son parámetros definidos como constantes de velocidad relativas a la pérdida de agua y a la ganancia de sólidos respectivamente (Parjoko *et al.*, 1996).

Para predecir las fracciones de pérdida de agua y ganancia de soluto por el alimento (ΔM_t^w y ΔM_t^s respectivamente) en el momento t en las ecuaciones (2.12) y (2.13), es necesario conocer los valores de S_1 , S_2 , ΔM_∞^w y ΔM_∞^s . Estas constantes pueden ser calculadas a través de una regresión lineal, usando datos experimentales obtenidos durante un periodo de tiempo (t). La forma lineal de las ecuaciones (2.12) y (2.13) se plasma de la siguiente manera:

$$\frac{t}{\Delta M_t^w} = \left(\frac{1}{\Delta M_\infty^w} \right) t + \left(\frac{1}{S_1 \Delta M_\infty^w} \right) \quad (2.15)$$

$$\frac{t}{\Delta M_t^s} = \left(\frac{1}{\Delta M_\infty^s} \right) t + \left(\frac{1}{S_2 \Delta M_\infty^s} \right) \quad (2.16)$$

Las ecuaciones (2.15) y (2.16) toman la forma de una ecuación lineal $y = mx + b$, el cual considerando la ecuación para la pérdida de agua se tiene $y = \frac{t}{\Delta M_t^w}$, $x = t$, $m = \frac{1}{\Delta M_\infty^w}$ y $b = \frac{1}{S_1 \Delta M_\infty^w}$, donde $\frac{1}{\Delta M_\infty^w}$ se pueden calcular a partir de la pendiente de $\frac{t}{\Delta M_t^w}$ contra t .

Relacionando la ecuación (2.7) con el modelo propuesto por la ecuación (2.12), se obtiene una ecuación capaz de calcular la difusividad efectiva en los diferentes tiempos:

$$D_e^w = \frac{\pi t}{4} \left[\left(\frac{S_1 l}{1 + S_1 t} \right) \left(\frac{\Delta M_\infty^{w,mod}}{\Delta M_\infty^{w,exp}} \right) \right]^2 \quad (2.17)$$

Donde:

$\Delta M_{\infty}^{w,mod}$: Fracción de agua perdida por el alimento en el equilibrio obtenido a través de una regresión lineal, ecuación (2.15).

$\Delta M_{\infty}^{w,exp}$: Fracción de agua perdida por el alimento en el equilibrio obtenido experimentalmente.

D_e^w : Difusividad efectiva para el agua en el tiempo t .

Cuando $\Delta M_{\infty}^{w,exp}$ no se conoce, se puede asumir que su valor es igual al $\Delta M_{\infty}^{w,mod}$ y la ecuación (2.17) puede ser usada para obtener buenas estimaciones de la D_e^w .

Reajustando la ecuación (2.17) para una geometría cúbica, es decir, considerando las dimensiones características como la arista de un cubo, y sustituyéndola en la ecuación (2.12), se llega a la ecuación (2.18):

$$D_e^w = \frac{\pi}{4t^{\frac{1}{3}}} \left[\left(\frac{S_1 l^3}{1 + S_1 t} \right) \left(\frac{\Delta M_{\infty}^{w,mod}}{\Delta M_{\infty}^{w,exp}} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (2.18)$$

Análogamente, la difusividad de los solutos puede ser obtenida por la ecuación (2.19):

$$D_e^s = \frac{\pi}{4t^{\frac{1}{3}}} \left[\left(\frac{S_2 l^3}{1 + S_2 t} \right) \left(\frac{\Delta M_{\infty}^{s,mod}}{\Delta M_{\infty}^{s,exp}} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (2.19)$$

Donde:

$\Delta M_{\infty}^{s,mod}$: Fracción de sólidos solubles ganados por el alimento en el equilibrio obtenido a través de una regresión lineal, ecuación (2.16).

$\Delta M_{\infty}^{s,exp}$: Fracción de sólidos solubles ganados por el alimento en el equilibrio obtenido experimentalmente.

D_e^s : Difusividad efectiva para los sólidos solubles en el tiempo t

l : Dimensión característica (la mitad del espesor del cubo), m

t : Tiempo, s

La difusividad efectiva media $\overline{D_e^j}$ fue calculado haciéndose una media aritmética de los valores de difusividad encontrados para cada tiempo:

$$\overline{D_e^j} = \frac{\sum_{n=1}^n (D_e^j)}{n} \quad (2.20)$$

Donde:

D_e^j : Difusividad efectiva para un componente del alimento en el tiempo t

n : Número de datos utilizados

$\overline{D_e^j}$: Difusividad efectiva media para un componente del alimento

Tabla 2.5: Valores de difusividades efectivas para el agua y sólidos en diferentes frutos.

$D_{e,w}$ (m ² /s)	$D_{e,s}$ (m ² /s)	Fruta	T (°C)	Concentración (°Brix)	Referencia
15x10 ⁻⁹ a 60x10 ⁻⁹		manzana	30-50	50-70	Conway <i>et al.</i> , 1983 citado por Spiazzi y Mascheroni, 1997
0,157x10 ⁻⁹ a 1,046x10 ⁻⁹	0,172x10 ⁻⁹ a 1,048x10 ⁻⁹	manzana	20-50	65	Salvatori <i>et al.</i> , 1999
0,016x10 ⁻⁹ a 0,187x10 ⁻⁹	0,013x10 ⁻⁹ a 0,211x10 ⁻⁹	manzana	20-50	65	Salvatori <i>et al.</i> , 1999
0,0332 x10 ⁻⁹ a 0,213 x10 ⁻⁹	0,0385 x10 ⁻⁹ a 0,108 x10 ⁻⁹	manzana	20-50	40-60	Kaymak <i>et al.</i> , 2000
0,314x10 ⁻⁹ a 0,655x10 ⁻⁹	0,107x10 ⁻⁹ a 0,933x10 ⁻⁹	papaya	30-50	50-70	Rodríguez <i>et al.</i> , 2003
1,3x10 ⁻⁹ 0,347 x10 ⁻⁹ a	3,47x10 ⁻⁹ 0,199 x10 ⁻⁹ a	papaya	25	saturado	Mendoza <i>et al.</i> , 2002
1,92 x10 ⁻⁹	3,6 x10 ⁻⁹	pera	40-60	40-70	Park <i>et al.</i> , 2002
1,72 x10 ⁻⁹	0,2 x10 ⁻⁹ a 0,46 x10 ⁻⁹	piña	50-70	50-70	Waliszewski <i>et al.</i> 2002
1,48 x10 ⁻⁹ a 3,24 x10 ⁻⁹	0,53 x10 ⁻⁹ a 1,54 x10 ⁻⁹	piña	30-50	40-70	Rastogi <i>et al.</i> , 2004
0,6x10 ⁻⁹ a 2,5x10 ⁻⁹		piña	30-50	50-70	Beristain <i>et al.</i> , 1990 citado por Spiazzi y Mascheroni, 1997
0,85x10 ⁻⁹ a 2,43x10 ⁻⁹		banano	25-45	40-70	Rastogi <i>et al.</i> , 1997a
0,018x10 ⁻⁹ a 0,077x10 ⁻⁹		mango	30	35-65	Giraldo <i>et al.</i> , 2003

2.6. Diseño factorial general

Los diseños factoriales se utilizan para “cribar” o tamizar el proceso, esto es, determinar por primera vez que factores de los que hemos incluido en el diseño, son relevantes para el proceso. Dentro de los arreglos factoriales, existen varios tipos:

- *El factorial general*
- *El factorial 3^k*
- *El factorial 2^k*
- *El Central Compuesto*
- *Diseños Plackett-Burman*
- *Diseños Box-Behnken*

Muchos experimentos requieren el estudio de los efectos de 2 ó más factores. En general, los experimentos factoriales son los más eficientes para este tipo de análisis.

En un experimento factorial se miden en cada etapa completa o replica del experimento, todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores.

Cuando los factores son arreglados en un experimento factorial, se dice frecuentemente que son cruzados. El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producido por un cambio en el nivel del factor. Esto frecuentemente se llama un efecto principal por que se refiere a los factores primarios de interés en el experimento (Reyes, 1997).

2.6.1. Diseño factorial 2^k

Los diseños factoriales son ampliamente utilizados en experimentos en los que intervienen varios factores para estudiar el efecto conjunto de estos sobre una respuesta. Existen varios casos especiales del diseño factorial general que resultan importantes porque se usan ampliamente en el trabajo de investigación, y porque constituyen la base para otros diseños de gran valor práctico (Montgomery, 2002).

El más importante de estos casos especiales ocurre cuando se tienen k factores, cada uno con dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos como sería el caso de dos valores de temperatura presión o tiempo. También pueden ser cualitativos como sería el caso de dos máquinas, dos operadores, los niveles "superior" e "inferior" de un factor, o quizás, la ausencia o presencia de un factor. Una réplica completa de tal diseño

requiere que se recopilen $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y se le llama diseño factorial 2^k (Reyes, 1997).

Se supone que 1) los factores son fijos, 2) los diseños son completamente aleatorios y 3) se satisface la suposición usual de normalidad.

El diseño 2^k es particularmente útil en las primeras fases del trabajo experimental, cuando es probable que haya muchos factores por investigar. Conlleva el menor número de corridas con las cuales pueden estudiarse k factores en un diseño factorial completo. Debido a que sólo hay dos niveles para cada factor, debe suponerse que la respuesta es aproximadamente lineal en el intervalo de los niveles elegidos de los factores (Montgomery, 2002).

2.6.2. Diseño factorial completo 2^3

Suponga que se encuentran en estudio tres factores A, B y C, cada uno con dos niveles, son de interés. Al diseño se le llama *diseño factorial 2^3* , y en este caso la representación geométrica de las ocho combinaciones de tratamientos puede hacerse con un cubo, como se muestra en la tabla 2.7 (a). Utilizando la notación “+” y “-” para representar los niveles alto y bajo de los factores, las ocho corridas del diseño 2^3 pueden enlistarse como en la tabla 2.7 (b). Se le conoce en ocasiones como la matriz de diseño. Haciendo una ampliación de la notación de las etiquetas, las combinaciones de los tratamientos en el orden estándar se escriben como (1), a, b, ab, c, ac, bc y abc. Recuerde que estos símbolos representan también el *total* de las n observaciones hechas con esa combinación de tratamientos particular (Montgomery, 2002).

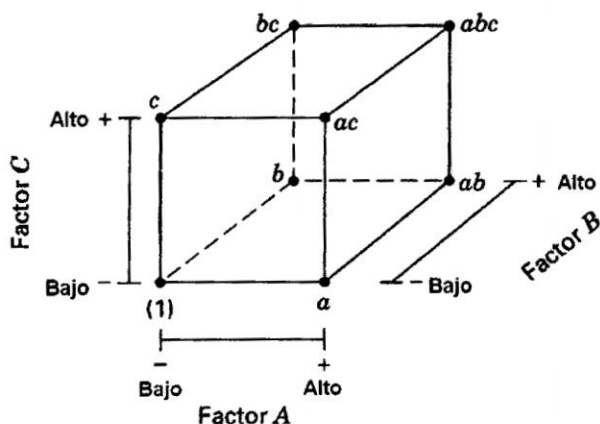
Existen en realidad tres notaciones diferentes para las corridas del diseño 2^3 que son de uso general. La primera es la notación + y -, llamada con frecuencia *notación geométrica*. La segunda es el uso de las etiquetas en *letras minúsculas* para identificar las *combinaciones de tratamientos*. La tercera y última notación utilizan los *dígitos* 1 y 0 para denotar los niveles *alto* y *bajo* del factor, respectivamente, de los factores, en lugar de + y -. Estas diferentes notaciones se ilustran enseguida para el diseño 2^3 (Montgomery, 2002).

Tabla 2.6: Notaciones diferentes para las corridas del *diseñofactorial* 2^3

Corrida	A	B	C	Etiquetas	A	B	C
1	-	-	-	(1)	0	0	0
2	+	-	-	a	1	0	0
3	-	+	-	b	0	1	0
4	+	+	-	ab	1	1	0
5	-	-	+	c	0	0	1
6	+	-	+	ac	1	0	1
7	-	+	+	bc	0	1	1
8	+	+	+	abc	1	1	1

Hay siete grados de libertad entre las ocho combinaciones de tratamientos del *diseño* 2^3 . Tres grados de libertad se asocian con los efectos principales de A, B y C. cuatro grados de libertad se asocian con las interacciones; uno con cada una de las interacciones AB, AC y BC y uno con la interacción ABC.

Tabla 2.7: El *diseñofactorial* 2^3 : (a) Vista geométrica, (b) La matriz del diseño



Corrida	Factor		
	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Capítulo 3

Materiales y Métodos

3.1. Ubicación

El estudio se desarrollo en los laboratorios de Transferencia de Masa y Análisis de Alimentos de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, ubicado en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga entre los meses de setiembre del 2010 a junio del 2011.

3.2. Materia prima

Los experimentos se realizaron utilizando Frutos de *Carica papaya* “Papaya” compradas en el mercado local de distribución mayorista, el mismo día de la realización de los experimentos.

3.3. Materiales reactivos y equipos

Los materiales reactivos y equipos utilizados para la experimentación fueron los siguientes:

3.3.1. Materiales

- Material de vidrio para análisis: vasos de precipitado, erlenmeyers, probetas, pipetas, placas petri, luna de reloj, pinzas, espátulas, tubos de ensayo, balón de kjeldahl, mortero, varilla, crisoles, etc.
- Cestas de metal de geometría cuadrada con 9 cm de ancho, 9 cm de largo y 13 cm de altura, con capacidad para 16 muestras cada una de ellas.

3.3.2. Reactivos

- Ácido clorhídrico
- Hidróxido de sodio
- Etanol
- n - Hexano
- Ácido sulfúrico
- Ácido bórico
- Catalizador (sulfato de potasio y sulfato de cobre)
- Sacarosa
- Glucosa

3.3.3. Equipos

- Termostato de acero inoxidable con recirculación y control de temperatura
- Balanza analítica OHAUS AS200, sensibilidad 0.0001g
- Refractómetro Universal ABBE de lectura de sólidos solubles de forma directa (0 - 95 %)
- Estufa de secado MEMMERT, graduación 0 - 240 °C

- Mufla digital marca BIONET S.A
- Equipo destilador de proteína
- Equipo de digestión de proteína
- Extractor soxhlet
- Cronómetro

3.4. Métodos de análisis

3.4.1. Características fisicoquímicas

Cada fruta a estudiar se basó en la similitud de distintas características físicas tales como tamaño, color, ausencia de defectos superficiales (daños por frío, daños por insectos, golpes y fisuras) y grado de madurez, con el objetivo de conseguir la mayor homogeneidad posible de las muestras y reducir de este modo la heterogeneidad en los resultados.

3.4.2. Análisis químico proximal

La composición químico proximal se realizó de acuerdo a los siguientes métodos:

- **Determinación de humedad:** Método de la A.O.A.C, (1998). Se determinó el fruto fresco y las muestras deshidratadas osmóticamente.
- **Determinación de cenizas:** Método de la A.O.A.C, (1998).
- **Determinación de fibra:** Método de la A.O.A.C, (1984).
- **Determinación de proteína:** Método de la A.O.A.C, (1984).
- **Determinación de grasa:** Método de la A.O.A.C, (1998).
- **Determinación de carbohidratos:** Según Pearson (1976) se obtiene por diferencia: $[100 - (\%humedad + \%ceniza + \%proteína + \%grasa + \%fibra)]$

- *Determinación del contenido en sólidos solubles:* Se realizó por refractometría.

La descripción de los análisis químicos se detalla en el apéndice A.

3.5. Metodología Experimental

La metodología y procedimiento de trabajo a seguir en el presente estudio se realizó según el diagrama de flujo que se muestra en la figura 3.1, en la cual se describe cada punto importante.

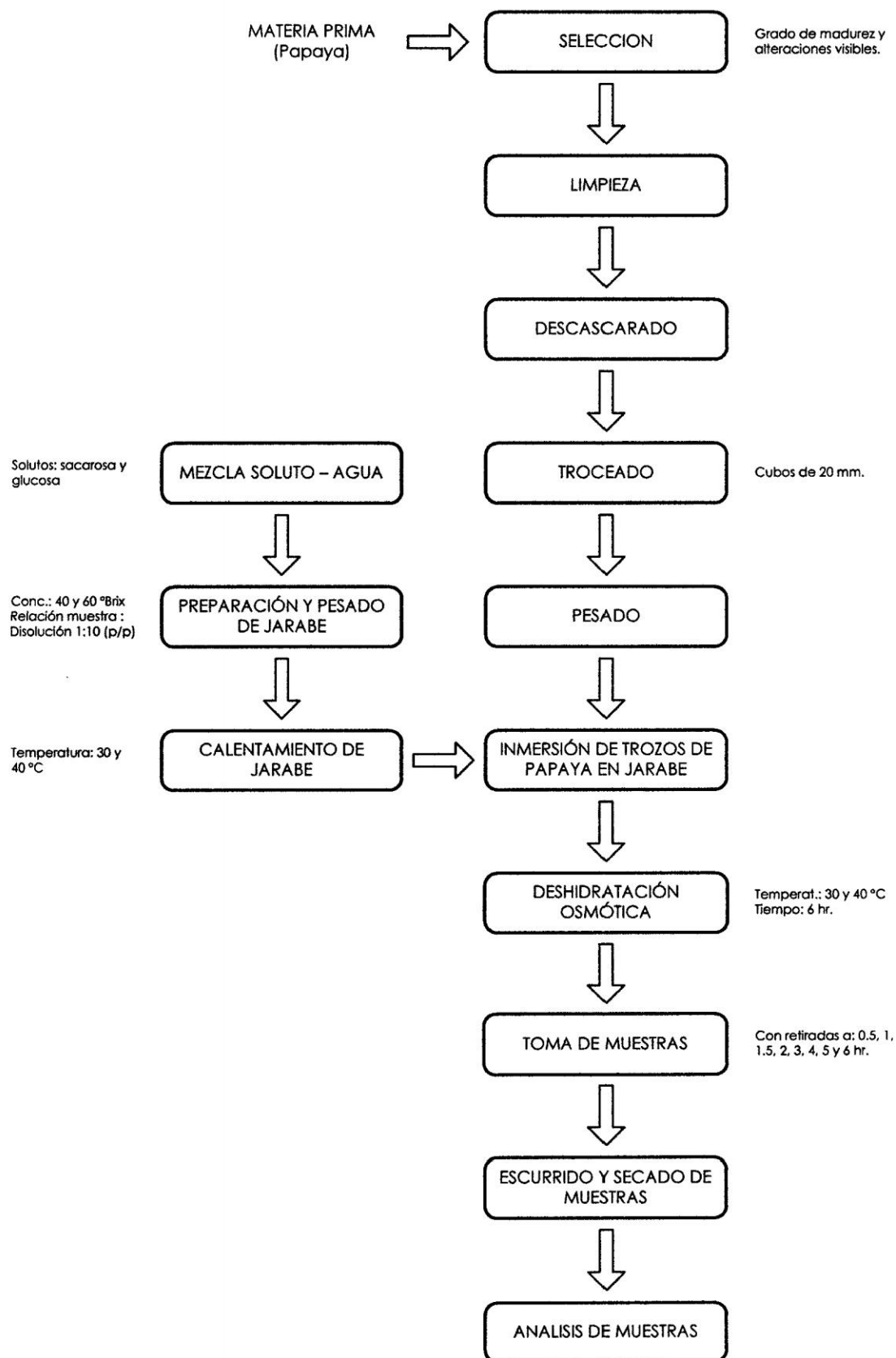


Figura 3.1: Proceso de Deshidratación Osmótica de trozos de papaya

3.5.1. Selección

La elección de los frutos se basó en la similitud de distintas características fisicoquímicas tales como tamaño, color, grado de madurez ausencia de defectos superficiales (daños por frío, daños por insectos, golpes y fisuras), con el objetivo de conseguir la mayor homogeneidad posible de las muestras de partida y reducir de este modo la heterogeneidad en los resultados.

3.5.2. Lavado

El lavado se realizó con agua corriente potable, repetidas veces (tres veces como mínimo), con la finalidad de eliminar la tierra adherida y materias extrañas a la cáscara.

3.5.3. Descascarado

Las papayas seleccionadas fueron descascaradas manualmente con un cuchillo hasta la remoción completa de la cascara.

3.5.4. Troceado

Las semillas fueron removidas y del mesocarpio (pulpa) se extrajeron cubos de 20 mm de arista, empleando para ello un cortador construido en lámina de aluminio, con base cuadrada (sacacubos) como se observa en la figura 3.2. Los cubos obtenidos se utilizaron para la caracterización de la muestra sin deshidratar, y para la realización de los diferentes tratamientos de deshidratación osmótica.

Para minimizar los efectos de la variabilidad natural de la papaya, debido a factores intrínsecos y extrínsecos del fruto como: Origen, lote, método de conservación, y cultivar, entre otros; se llevaba a cabo un método de muestreo que contemplaba la obtención de cubos de cada uno de las papayas en una determinada muestra. Cada experimento de deshidratación osmótica se llevaba a cabo con un número determinado de cubos, que en conjunto constituía una muestra; cada muestra estaba formada por cubos los de diferentes papayas.

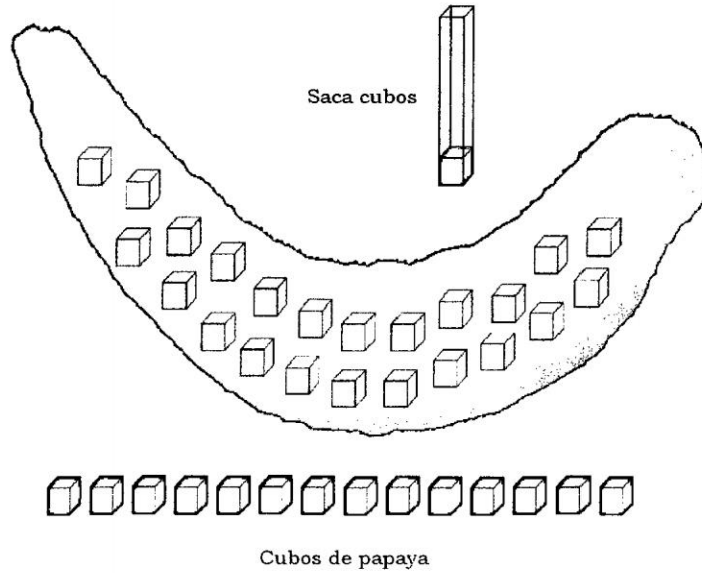


Figura 3.2: Corte de la papaya y obtención de cubos

3.5.5. Pesado

Las muestras (conjunto de cubos de papaya) previamente identificadas fueron pesadas para así proceder a realizar su respectivo análisis.

3.5.6. Obtención de disoluciones de trabajo

Como agente osmótico se emplearon soluciones de sacarosa (azúcar blanca, marca Cartavio), y jarabe de glucosa (85 °Brix, marca Marva S.A.), preparados en agua destilada, empleando para ello recipientes plásticos de 3 L y un baño termostataado para facilitar la disolución. Las soluciones fueron dejadas en reposo hasta su estabilización (solución límpida, sin partículas suspendidas). La concentración en °Brix de sacarosa y jarabe de glucosa en las disoluciones, variaron en función del diseño experimental especificado en la tabla 3.1, preparándose cuatro soluciones diferentes:

- *Solución de sacarosa a 40 °Brix.*
- *Solución de sacarosa a 60 °Brix.*
- *Solución de glucosa a 40 °Brix.*

- *Solución de glucosa a 60 °Brix.*

Para evitar cambios significativos en la concentración de las disoluciones, debido al intercambio de materia que se produce durante el proceso (flujo de agua desde el producto a la disolución y entrada de disolución concentrada en el producto), se empleó durante la deshidratación una relación mínima de fruta:disolución de 1:10 (p/p) a fin de garantizar que la concentración de la solución osmótica permanezca constante a lo largo del proceso.

3.5.7. Proceso de deshidratación osmótica

Para esto se llevo a cabo corridas de acuerdo al *diseño experimental* especificado en las tablas 3.2 y 3.3, donde se fijaron las condiciones de las variables para el desarrollo del proceso de deshidratación osmótica de acuerdo a lo recomendado por Sharma *et al.*, (2003); Colomer e Ibarz (1994). Las muestras (conjunto de cubos de papaya) previamente pesadas e identificadas fueron colocados en cestas compartimentadas de geometría cuadrada, con capacidad de 16 cubos por cesta, sumergido luego en los vasos de precipitado de 1500 *ml* provistos de la disolución hipertónica (figura 3.3), los cuales permanecían en condiciones de temperatura constante en el baño termostático con agitación durante todo el proceso (figura 3.4), asegurandose tambien una suficiente agitación de la disolución osmótica alrededor de las muestras para prevenir posibles diluciones en la zona próxima a la interfase (control interno del proceso). Esta disposición (figura 3.3) fue diseñada para garantizar que los cubos de papaya no estén en contacto unos con otros durante la experimentación, evitando así la disminución del área de contacto entre el trozo de fruta y la solución osmótica.

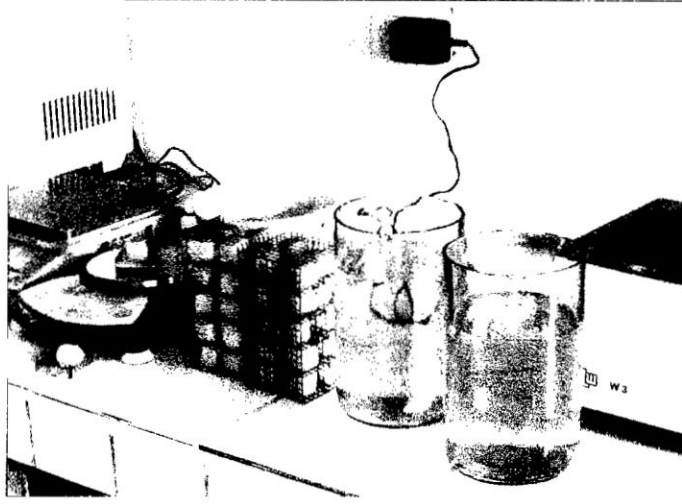


Figura 3.3: Cesta de DO y recipiente con la solución osmótica utilizados en los experimentos.

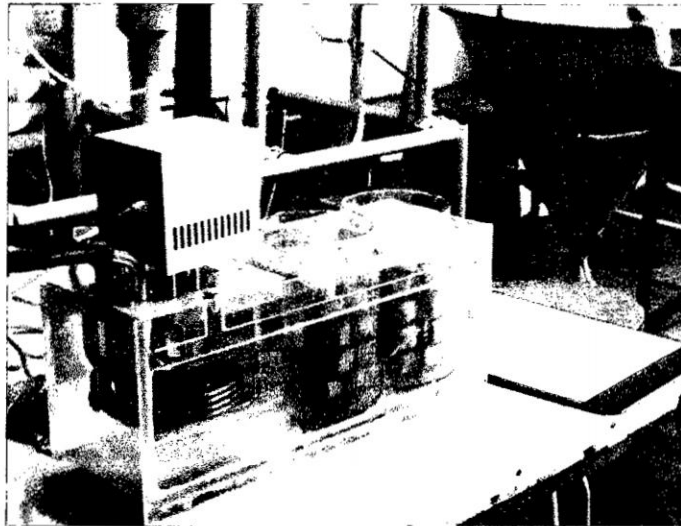


Figura 3.4: Recipientes con su respectiva cesta de muestras sumergidos en un baño termostático con agitación.

3.5.8. Toma de muestras y análisis

Las muestras fueron extraídas periódicamente de manera tal que cada una de ellas representó un tiempo de operación (30, 60, 90, 120, 180, 240, 300 y 360 minutos de proceso). Una vez extraídas las muestras de las cestas, se eliminó la disolución superficial utilizando papel absorbente, para así proceder a realizar su respectivo análisis por duplicado de masa, contenido de sólidos solubles y contenido de humedad.

3.6. Determinación de los parámetros cinéticos y difusionales

3.6.1. Porcentaje de pérdida de agua (% PA)

Se calculó para los tiempos de 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300 y 360 minutos, de acuerdo a la ecuación reportada por Beristain *et al* (1990):

$$\Delta M_t^w = \frac{(M_o^o X_o^w) - (M_t^o X_t^w)}{M_o^o} \quad (3.1)$$

ΔM_t^w : Fracción de agua (g agua / 100g de muestra) perdido por el alimento en el tiempo t

M_o^o : Masa total inicial

X_o^w : Fracción de humedad en el alimento, inicialmente

M_t^o : Masa total en un tiempo t

X_t^w : Fracción de humedad en el alimento, en un tiempo t

Por lo tanto el porcentaje de pérdida de agua (% PA) se calcula con la siguiente ecuación:

$$\%PA = [\Delta M_t^w] 100 \quad (3.2)$$

3.6.2. Porcentaje de ganancia de sólidos solubles (% GS)

Se calculó para los tiempos 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5 y 6 hr, de acuerdo a la ecuación reportada por Beristain *et al* (1990):

$$\Delta M_t^s = \frac{M_t^o (1 - X_t^w) - M_o^o (1 - X_o^w)}{M_o^o} \quad (3.3)$$

ΔM_t^s : Fracción de sólidos solubles ganados por el alimento en el tiempo t

M_o^o : Masa total inicial

X_o^w : Fracción de humedad en el alimento, inicialmente

M_t^o : Masa total en un tiempo t

X_t^w : Fracción de humedad en el alimento, en un tiempo t

Por lo tanto el porcentaje de pérdida de agua (% PA) se calcula con la siguiente ecuación:

$$\%GS = [\Delta M_t^s] 100 \quad (3.4)$$

3.6.3. Porcentaje de pérdida de masa (% PP)

Se calculó para los tiempos 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5 y 6 hr, de acuerdo a la ecuación reportada por Beristain *et al* (1990):

$$\Delta M_t = \frac{M_o^o - M_t^o}{M_o^o} \quad (3.5)$$

Donde:

ΔM_t : Fracción de masa perdido por el alimento en el tiempo t

M_o^o : Masa total inicial

M_t^o : Masa total en un tiempo t

Por lo tanto el porcentaje de pérdida de masa (% PP) se calcula con la siguiente ecuación:

$$\%PP = [\Delta M_t] 100 \quad (3.6)$$

3.6.4. Modelado Matemático para el cálculo de la transferencia de masa durante la DO

Las difusividades efectivas medias $\overline{D_e^j}$ del agua y de los solutos se calculo a través del modelo de Azuara *et al.* (1992) usando los parámetros obtenidos antes mencionados.

$$\Delta M_t^j = \frac{S_j t (\Delta M_\infty^j)}{1 + S_j t} \quad (3.7)$$

Donde:

ΔM_t^j : Fracción de agua perdida o de sólidos solubles ganados por el alimento en el tiempo t

ΔM_∞^j : Fracción de agua perdida o de sólidos solubles ganados por el alimento en el equilibrio

S_j : parámetro definido como constante de velocidad relativa a la pérdida de agua o a la ganancia de sólidos (Parjoko *et al.*, 1996)

Para predecir ΔM_t^j (Fracción de agua perdida o de sólidos solubles ganados por el alimento) en el momento (t) en la ecuación (3.4), es necesario conocer el valor de S_j y ΔM_∞^j . Estas constantes pueden ser calculadas a través de una regresión lineal, usando datos experimentales obtenidos durante un periodo de tiempo (t). La forma lineal de la ecuación (3.4) se plasma de la siguiente manera:

$$\frac{t}{\Delta M_t^j} = \left(\frac{1}{\Delta M_\infty^j} \right) t + \left(\frac{1}{S_j \Delta M_\infty^j} \right) \quad (3.8)$$

La ecuación (3.5) toma la forma de una ecuación lineal $y = mx + b$, el cual considerando la ecuación se tiene $y = \frac{t}{\Delta M_t^j}$, $x = t$, $m = \frac{1}{\Delta M_\infty^j}$ y $b = \frac{1}{S_j \Delta M_\infty^j}$, donde $\frac{1}{\Delta M_\infty^j}$ se pueden calcular a partir de la pendiente de $\frac{t}{\Delta M_t^j}$ contra t .

Relacionando la ecuación (3.5) con el modelo propuesto por Crank (1975) el cual basándose en la segunda *ley de Fick* propuso una ecuación para la difusión:

$$\frac{\Delta M_t^j}{\Delta M_\infty^j} = 2 \left\{ \frac{D_e^j t}{l^2 \pi} \right\}^{0,5} \quad (3.9)$$

Obteniéndose una ecuación capaz de calcular la difusividad efectiva en los diferentes tiempos para una geometría cúbica, es decir, considerando las dimensiones características como la arista de un cubo:

$$D_e^w = \frac{\pi}{4t^{\frac{1}{3}}} \left[\left(\frac{S_w l^3}{1 + S_w t} \right) \left(\frac{\Delta M_\infty^{w,mod}}{\Delta M_\infty^{w,exp}} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (3.10)$$

Análogamente, la difusividad de los solutos puede ser obtenida por la ecuación (3.11):

$$D_e^s = \frac{\pi}{4t^{\frac{1}{3}}} \left[\left(\frac{S_s l^3}{1 + S_s t} \right) \left(\frac{\Delta M_\infty^{s,mod}}{\Delta M_\infty^{s,exp}} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (3.11)$$

Donde:

D_e^w : Difusividad efectiva para el agua en el tiempo t , $\frac{m^2}{s}$

$\Delta M_\infty^{w,mod}$: Fracción de agua perdida por el alimento en el equilibrio obtenido a través de una regresión lineal, ecuación (3.5).

$\Delta M_\infty^{w,exp}$: Fracción de agua perdida por el alimento en el equilibrio obtenido experimentalmente.

l : Dimensión característica (la mitad del espesor del cubo), m

t : Tiempo, s

D_e^s : Difusividad efectiva para los sólidos solubles en el tiempo t , $\frac{m^2}{s}$

$\Delta M_\infty^{s,mod}$: Fracción de sólidos solubles ganados por el alimento en el equilibrio obtenido a través de una regresión lineal, ecuación (3.5).

$\Delta M_\infty^{s,exp}$: Fracción de sólidos solubles ganados por el alimento en el equilibrio obtenido experimentalmente.

La difusividad efectiva media $\overline{D_e^j}$ fue calculado haciéndose una media aritmética de los valores de difusividad encontrados para cada tiempo:

$$\overline{D_e^j} = \frac{\sum_{n=1}^n (D_e^j)}{n} \quad (3.12)$$

Donde:

D_e^j : Difusividad efectiva para un componente del alimento en el tiempo t , $\frac{m^2}{s}$

n : Número de datos utilizados

$\overline{D_e^j}$: Difusividad efectiva media para un componente del alimento, $\frac{m^2}{s}$

3.7. Diseño experimental

El diseño experimental empleado está basado en un diseño factorial completo 2^3 , 2 es el número de niveles independientes y 3 es el número de factores; donde el agente osmótico (soluto), concentración de la disolución y temperatura de la disolución son los factores a estudiar, cada uno con dos niveles (Montgomery, 2002). La implementación comprende la ejecución de 8 tratamientos, con cada 3 repeticiones, para un total de 24 pruebas.

Como variable respuesta se evaluaron el porcentaje de pérdida de agua (% PA), porcentaje de ganancia de sólidos solubles (% GS), porcentaje de pérdida de masa (% PP).

3.7.1. Factores y dominio experimental

Para este diseño de proceso, se fijaron las condiciones de las variables para el desarrollo del proceso de deshidratación osmótica de acuerdo a lo recomendado por Sharma *et al.*, (2003); Colomer e Ibarz (1994), donde los factores escogidos para el experimento y el dominio experimental se muestran en la tabla 3.1. El dominio experimental de un factor continuo (concentración y temperatura) se expresa con los valores mínimo y máximo que puede tomar, y se asigna la notación codificada “-1” al nivel inferior y “1” al superior. El dominio experimental de un factor discreto (el agente osmótico) se expresa con la lista de valores que tomará. Y en este caso es irrelevante qué nivel es el “-1” y cuál es el “1”. La notación codificada es especialmente útil para el factor discreto, ya que permitirá obtener una estimación numérica de su efecto a pesar de que el factor no toma valores numéricos.

Tabla 3.1: Factores y dominio experimental.

Factores	Dominio Experimental	
	Nivel (-1)	Nivel (1)
<i>A</i> : Concentración de la solución [°Brix]	40	60
<i>B</i> : Temperatura de la solución [°C]	30	40
<i>C</i> : Agente osmótico (soluto)	Glucosa	Sacarosa

Tabla 3.2: Niveles codificados de las variables del diseño factorial completo 2^3 y respuestas a medir.

Ensayo	Factores			Respuestas		
	Concentración (°Brix)	Temperatura (°C)	Agente osmótico	PA (%)	GS (%)	PP (%)
T_1	-1	-1	-1	y_{11}	y_{21}	y_{31}
T_2	+1	-1	-1	y_{12}	y_{22}	y_{32}
T_3	-1	+1	-1	y_{13}	y_{23}	y_{33}
T_4	+1	+1	-1	y_{14}	y_{24}	y_{34}
T_5	-1	-1	+1	y_{15}	y_{25}	y_{35}
T_6	+1	-1	+1	y_{16}	y_{26}	y_{36}
T_7	-1	+1	+1	y_{17}	y_{27}	y_{37}
T_8	+1	+1	+1	y_{18}	y_{28}	y_{38}

3.7.2. Matriz de experimentos

La tabla 3.3 muestra el plan de experimentación para las 24 pruebas (8 tratamientos con 3 repeticiones) que se obtiene al reemplazar los valores -1 y 1 por los valores de las variables reales. También muestra las respuestas que se obtendrá al realizar los experimentos en orden aleatorio.

Tabla 3.3: Matriz de experimentos del diseño factorial completo 2^3 con 3 repeticiones, plan de experimentación y respuestas a medir.

Std	Run	Factor 1 A: Concen- tración °Brix	Factor 2 B: Tempe- ratura °C	Factor 3 C: Agente Osmótico	Response 1 Ganancia de Sólidos %	Response 2 Pérdida de Masa %	Response 3 Pérdida de Agua %
T_5^{R1}	1	-1	-1	{1}			
T_5^{R2}	2	-1	-1	{1}			
T_2^{R1}	3	1	-1	{-1}			
T_7^{R1}	4	-1	1	{1}			
T_2^{R2}	5	1	-1	{-1}			
T_5^{R3}	6	-1	-1	{1}			
T_6^{R1}	7	1	-1	{1}			
T_3^{R1}	8	-1	1	{-1}			
T_1^{R1}	9	-1	-1	{-1}			
T_4^{R1}	10	1	1	{-1}			
T_3^{R2}	11	-1	1	{-1}			
T_1^{R2}	12	-1	-1	{-1}			
T_4^{R2}	13	1	1	{-1}			
T_4^{R3}	14	1	1	{-1}			
T_2^{R3}	15	1	-1	{-1}			
T_7^{R2}	16	-1	1	{1}			
T_8^{R1}	17	1	1	{1}			
T_6^{R2}	18	1	-1	{1}			
T_7^{R3}	19	-1	1	{1}			
T_6^{R3}	20	1	-1	{1}			
T_1^{R3}	21	-1	-1	{-1}			
T_8^{R2}	22	1	1	{1}			
T_3^{R3}	23	-1	1	{-1}			
T_8^{R3}	24	1	1	{1}			

Para conocer el efecto de un factor es suficiente con hacerlo variar entre dos valores. Los más adecuados son los extremos de su dominio experimental: entre el nivel (-1) y el (1). Y además esta variación se debe realizar para cada posible combinación de los valores de los demás factores. Esto permitirá descubrir si el efecto depende de qué

valor tomen los otros factores.

Las variables de respuesta se evaluó estadísticamente mediante la aplicación del análisis de varianza (ANOVA) para un nivel de significancia de 5 % ($p < 0,05$) mediante el paquete de software comercial Design-Expert[®]¹.

¹En el desarrollo de la presente tesis se utilizó el programa *Design-Expert*[®] versión 8.0.6 (Stat-Ease, Inc.).

Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1. Evaluación sensorial de la papaya

La papaya variedad criolla, presenta las características que se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Evaluación sensorial de la papaya.

CARACTERÍSTICAS	RESULTADOS
Grado de madurez	: <i>Pintón</i>
Textura	: <i>Resistente al tratamiento</i>
Sabor	: <i>Dulce</i>
Olor	: <i>Característico</i>
Forma	: <i>Ovalada</i>
Apariencia de la cáscara	: <i>Lisa</i>
Consistencia de la pulpa	: <i>Camosa</i>
Color de la cáscara	: <i>Verde con tonos amarillos</i>
Color de la pulpa	: <i>Anaranjado - Amarillo</i>
Peso del fruto (promedio)	: <i>1.47 kg</i>
% de cáscara	: <i>8.96</i>
% de pulpa	: <i>82.85</i>
% de semilla	: <i>8.19</i>
Longitud	: <i>22 cm.</i>
Diámetro	: <i>15 cm.</i>

La papaya se encuentra en condiciones óptimas para el procesamiento de acuerdo a las características antes mostradas, donde la textura es dura, firme adecuada para

soportar procesos a la que será sometida. Características semejantes son recomendados por Pestano (2001) y Kalra *et al.* (1995) en trabajos similares.

Respecto del sabor color y olor, estas características son propias de la papaya, las mismas que deben conservarse o mejorar en los procesos de obtención de trozos de papaya osmodeshidratada, Shafiur (2003).

4.2. Análisis proximal de la papaya

Los resultados del análisis proximal para la papaya fresca se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Análisis proximal de la papaya fresca

Componente	Papaya (estado pintón)
Humedad [*]	89.63
Proteína [*]	0.34
Grasa [*]	0.96
Cenizas [*]	0.54
Carbohidratos [*]	7.61
Fibra cruda [*]	0.92
Sólidos solubles (°Brix)	9.20

^{*}unidades en % referidas a 100 g de muestra

Valores que comparados con lo reportado por Collazos (1996) existe una ligera variación, esta variación composicional Tijero (1992) señala que se debe a factores como tipo de suelo, clima, humedad del ambiente, especie y estado fisiológico.

4.3. Cinética de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica

4.3.1. Variación de masa de agua, sólidos solubles y masa total en función del tiempo

4.3.1.1. Pérdida de agua

En la tabla 4.3 se muestra los datos experimentales de porcentaje de pérdida de agua (%PA) del alimento obtenidos para los ocho tratamientos¹ a diferentes tiempos de proceso.

Tabla 4.3: Porcentaje de pérdida de agua(%PA) para los ocho tratamientos a diferentes tiempos de proceso.

PÉRDIDA DE AGUA (% PA)								
t (h)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
0.5	9.515	15.332	16.976	13.937	12.440	17.672	17.716	20.962
1	11.676	21.828	20.166	17.693	15.960	22.700	23.035	26.104
1.5	14.727	25.184	22.204	21.621	18.876	30.058	27.326	29.397
2	16.901	28.786	27.421	25.889	18.627	27.365	30.074	33.013
3	18.312	35.193	32.029	29.395	24.011	36.058	33.095	37.901
4	22.685	38.870	35.117	35.170	23.575	40.377	38.281	42.694
5	23.728	40.933	37.304	37.362	26.120	44.762	39.259	46.093
6	26.363	44.049	39.290	41.951	28.998	51.746	43.399	50.778

La evolución de la pérdida de agua se aprecia en las figuras 4.1 y 4.2, observándose que aumentan a medida que aumenta el tiempo de tratamiento, se produjo una diferencia significativa entre los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T8. La diferencia fue notoria, con pérdidas de agua durante la primera hora, para T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T8, de 11.676, 21.828, 20.166, 17.693, 15.960, 22.700, 23.035 y 26.104 %, respectivamente.

La mayor tasa de salida de agua se pudo observar principalmente en los ensayos

¹Para cada tratamiento, se reporta el promedio de las tres repeticiones.

realizados con sacarosa, consecuencia de la gran fuerza motriz existente entre la fruta y la solución hipertónica en el inicio del proceso. El aumento de la concentración y de la temperatura de la solución favorecieron la pérdida de agua en el producto por el mayor gradiente de presión osmótica en la interfaz producto/solución, proporcionando una mayor tasa de transferencia de masa. Comportamiento semejante fue observado por Ceballos (2005), Rastogi & Raghavarao (2004) y Sanjinez (1999) en trabajos similares, donde los autores afirman que mayores tasas de pérdida de agua son obtenidas con la combinación alta temperatura y concentración de la solución hipertónica.

Se destaca la efectividad de la Sacarosa y el efecto sinérgico de la concentración de solutos y la temperatura de solución en la velocidad de pérdida de agua, ya que con una concentración total de 60°Brix produjo una pérdida de agua que supero en 7 – 9 % el valor obtenido con un 60 °Brix de Glucosa. Los valores finales en promedio son: 26.363, 44.049, 39.290, 41.951, 28.998, 51.746, 43.399 y 50.778 %, para T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T8, respectivamente.

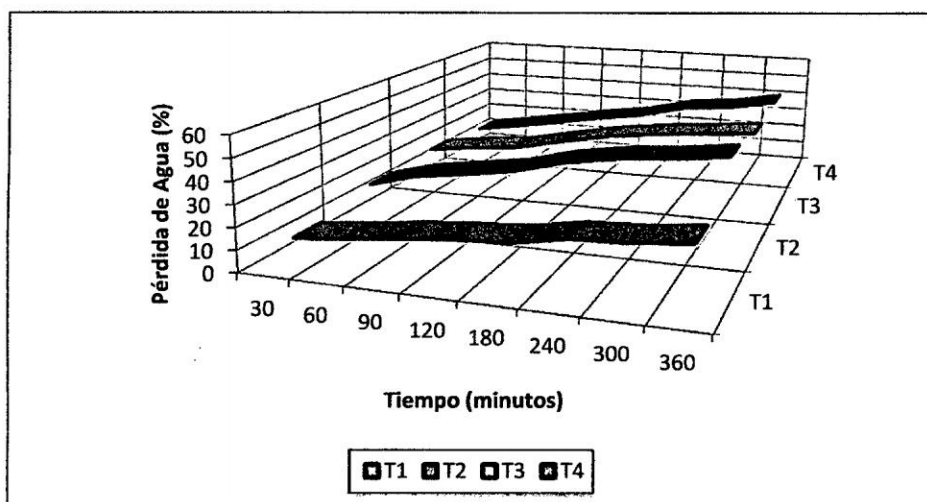


Figura 4.1: Cinéticas de pérdida de agua para los tratamientos 1, 2, 3 y 4 durante 6 horas de proceso

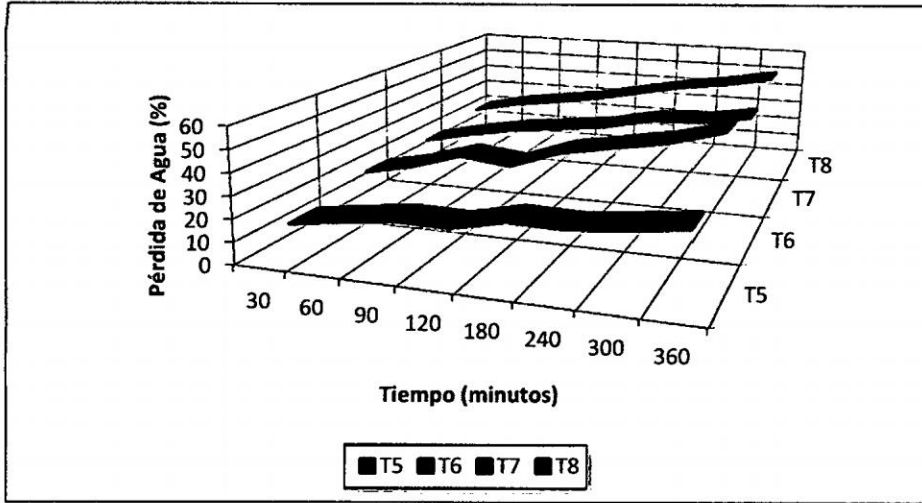


Figura 4.2: Cinéticas de pérdida de agua para los tratamientos 5, 6, 7 y 8 durante 6 horas de proceso

4.3.1.2. Ganancia de Sólidos

En la tabla 4.4 se muestra los datos experimentales de porcentaje de ganancia de sólidos (%GS) del alimento obtenidos para los ocho tratamientos² a diferentes tiempos de proceso.

Tabla 4.4: Porcentaje de ganancia de sólidos (%GS) para los ocho tratamientos a diferentes tiempos de proceso.

GANANCIA DE SÓLIDOS (% GS)								
t (h)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
0.5	4.581	2.154	3.964	5.809	2.534	0.934	2.595	2.749
1	4.999	2.781	4.017	7.019	3.003	1.710	2.934	4.962
1.5	5.833	3.546	5.028	8.489	4.505	2.119	3.026	6.470
2	6.996	4.806	4.685	9.171	5.158	2.614	3.843	6.925
3	8.317	4.937	5.959	9.824	5.998	3.325	4.598	6.822
4	9.037	5.799	7.222	10.816	6.811	3.966	5.383	7.110
5	10.809	6.837	6.827	11.021	7.300	4.457	7.042	8.602
6	11.079	8.211	8.091	12.217	8.910	5.449	6.474	8.607

La evolución de la ganancia de sólidos se aprecia en las figuras 4.3 y 4.4, observándose que aumentan a medida que aumenta el tiempo de tratamiento; así como también

²Para cada tratamiento, se reporta el promedio de las tres repeticiones.

diferencias significativas entre los tratamientos con glucosa y sacarosa. La diferencia fue notoria, con ganancia de sólidos durante la primera hora, para T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T8, de 4.999, 2.781, 4.017, 7.019, 3.003, 1.710, 2.934 y 4.962 %, respectivamente. De manera general, la papaya deshidratado osmóticamente con solución de sacarosa presentó una incorporación de solutos inferior al procesado con glucosa a lo largo del tiempo de proceso, lo que puede ser atribuido a las diferencias entre el peso molecular de las dos soluciones utilizadas, hecho que también fue verificado por Giraldo *et al.* (2003), Lazarides *et al.* (1995) y Moreno (1999) en sus trabajos con mangos, manzanas y fresas, respectivamente.

Analizando el efecto de la concentración de la solución osmótica en la ganancia de sólidos, se notó una disminución de la incorporación tanto de glucosa como de sacarosa con el aumento de la concentración de la solución, pues soluciones más concentradas limitan la entrada de sólidos en el producto por la formación de una capa superficial de azúcar alrededor de la fruta. Sanjinez-Argandoña (1999), Talens *et al.* (2002) y Giraldo *et al.* (2003) también observaron este comportamiento en sus estudios con guayabas, kiwis y mangos, respectivamente. Sin embargo, en el presente trabajo, eso ocurrió sólo a temperatura de 30°C, cuando la viscosidad de la solución fue mayor, representando una barrera para la transferencia de masa de la solución para la fruta. La reducción de la viscosidad de la solución a 40°C influyó en una mayor tasa de incorporación de sólidos, con el aumento de la concentración de la solución.

En relación a la influencia de la temperatura, la papaya deshidratado osmóticamente con glucosa a 40°C presentó una ganancia de soluto superior al procesado a temperatura de 30°C (Figuras m y n), favorecido por la temperatura más alta que altera la permeabilidad de la membrana celular, permitiendo un mayor ingreso de glucosa para la fruta. Por otro lado, en los tratamientos con sacarosa, se observó una mayor incorporación de azúcares solamente en la concentración de 60°Brix (Figuras m y n), mientras que en la otra concentración (40°Brix), se observó una menor ganancia de sólidos a temperatura de 40°C, hecho que puede ser atribuido a una posible mayor preservación de la estructura celular por la sacarosa, impidiendo una entrada elevada

de azúcar para el interior de la fruta en una temperatura más alta. Los valores finales en promedio son: 11.079, 8.211, 8.091, 12.217, 8.910, 5.449, 6.474 y 8.607%, para T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T8, respectivamente.

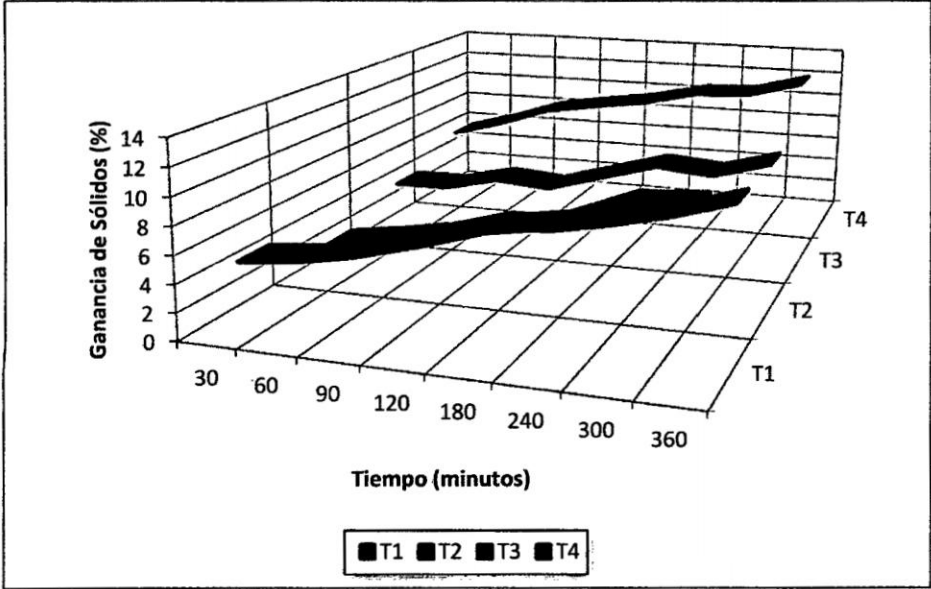


Figura 4.3: Cinéticas de ganancia de sólidos para los tratamientos 1, 2, 3 y 4 durante 6 horas de proceso

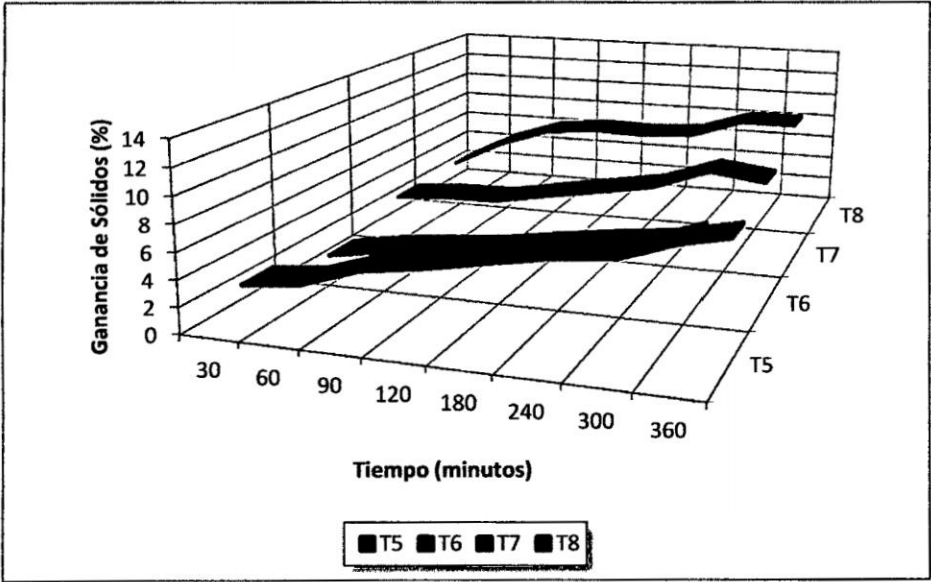


Figura 4.4: Cinéticas de ganancia de sólidos para los tratamientos 5, 6, 7 y 8 durante 6 horas de proceso

4.3.1.3. Pérdida de masa

En la tabla 4.5 se muestra los datos experimentales porcentaje de pérdida de masa (%PP) del alimento obtenidos para los ocho tratamientos³ a diferentes tiempos de proceso.

Tabla 4.5: Porcentaje de pérdida de masa (%PP) para los ocho tratamientos a diferentes tiempos de proceso.

PÉRDIDA DE MASA (% PP)								
t (h)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
0.5	4.935	13.178	13.012	8.128	9.905	16.737	15.121	18.213
1	6.677	19.046	16.150	10.673	12.957	20.990	20.100	21.142
1.5	8.894	21.637	17.176	13.132	14.371	27.939	24.300	22.926
2	9.905	23.980	22.736	16.718	13.469	24.751	26.231	26.089
3	9.995	30.256	26.069	19.571	18.014	32.733	28.496	31.080
4	13.648	33.071	27.895	24.354	16.765	36.411	32.897	35.584
5	12.919	34.096	30.477	26.341	18.820	40.306	32.217	37.491
6	15.284	35.839	31.199	29.734	20.087	46.298	36.925	42.171

Durante las dos primeras horas de tratamiento, se produjo una diferencia significativa entre los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T8. La diferencia fue notoria, con pérdidas de masa durante la primera hora, para T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T8, de 6.677, 19.046, 16.150, 10.673, 12.957, 20.990, 20.100 y 21.142 %, respectivamente. A partir de la tercera hora del proceso, todos los tratamientos se diferenciaron entre sí. La evolución de la pérdida de masa se puede observar en las figuras 4.5 y 4.6.

Se destaca la efectividad de la Sacarosa y el efecto de la concentración de solutos en la velocidad de pérdida de masa ya que con una concentración total de 60°Brix produjo una pérdida de peso que supero en 9 – 12 % el valor obtenido con un 60°Brix de Glucosa durante todo el proceso.

Nuevamente se aprecia en forma muy clara el efecto sinérgico de la concentración de solutos y la temperatura de solución. Para un mismo contenido de sólidos solubles, 60 °Brix y temperatura 30°C, la solución generó una pérdida de masa mayor que la

³Para cada tratamiento, se reporta el promedio de las tres repeticiones.

solución de 60 °Brix y temperatura 40°C, pues a 30°C la viscosidad de la solución es mayor, representando una barrera para la transferencia de masa de la solución para la fruta. La reducción de la viscosidad de la solución a 40°C influyó en una mayor tasa de incorporación de sólidos, con el aumento de la concentración de la solución. Los valores finales en promedio son: 15.284, 35.839, 31.199, 29.734, 20.087, 46.298, 36.925 y 42.171 %, para T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T8, respectivamente.

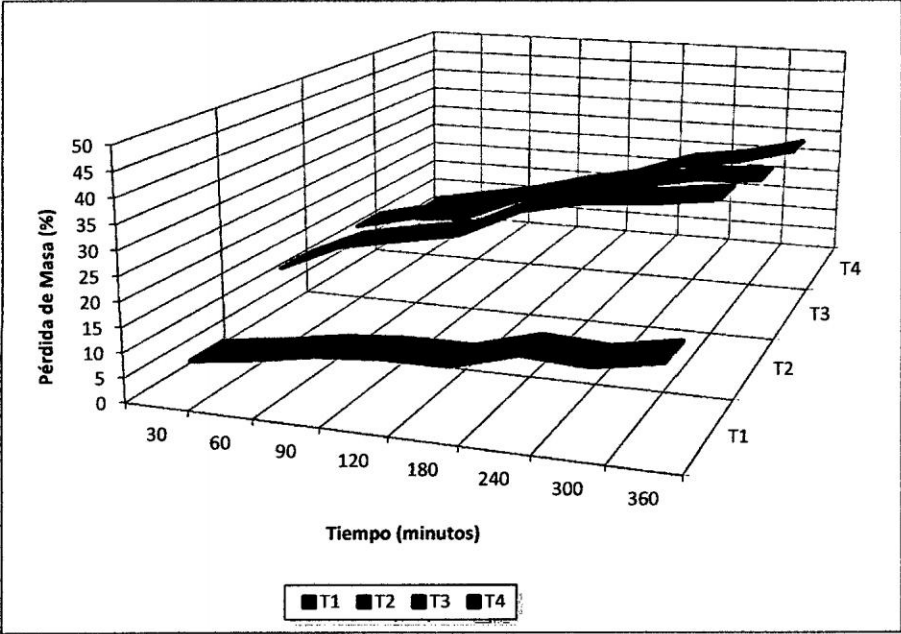


Figura 4.5: Cinéticas de pérdida de masa para los tratamientos 1, 2, 3 y 4 durante 6 horas de proceso

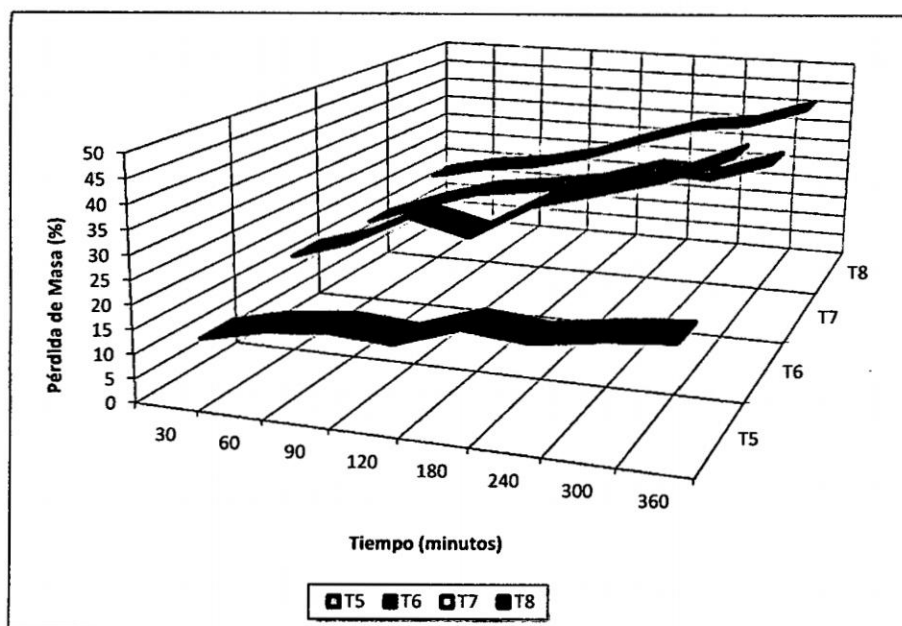


Figura 4.6: Cinéticas de pérdida de masa para los tratamientos 5, 6, 7 y 8 durante 6 horas de proceso

4.3.2. Cálculo de los parámetros cinéticos D_e^w y D_e^{ss}

Las tablas 4.6 y 4.7 muestra los valores de difusividad efectiva de agua (D_e^w), de sólidos solubles (D_e^{ss}) y sus respectivas difusividades efectivas medias obtenidos para los diferentes tratamientos a través del modelo de Azuara *et al.* (1992), los respectivos calculos se detalla en el anexo D.

Tabla 4.6: Difusividades efectivas del agua y sólidos solubles para los tratamientos 1, 2, 3 y 4 durante 6 horas de proceso

t (h)	Tratamiento 01		Tratamiento 02		Tratamiento 03		Tratamiento 04	
	D_e^w ($m^2 \cdot s^{-1}$)	D_e^{ss} ($m^2 \cdot s^{-1}$)	D_e^w ($m^2 \cdot s^{-1}$)	D_e^{ss} ($m^2 \cdot s^{-1}$)	D_e^w ($m^2 \cdot s^{-1}$)	D_e^{ss} ($m^2 \cdot s^{-1}$)	D_e^w ($m^2 \cdot s^{-1}$)	D_e^{ss} ($m^2 \cdot s^{-1}$)
0.5	3.658E-08	3.373E-08	3.947E-08	3.635E-08	3.635E-08	3.288E-08	3.669E-08	3.877E-08
1	2.211E-08	2.206E-08	2.140E-08	2.216E-08	2.188E-08	2.189E-08	2.196E-08	2.205E-08
1.5	1.478E-08	1.554E-08	1.508E-08	1.517E-08	1.574E-08	1.440E-08	1.512E-08	1.450E-08
2	1.112E-08	1.136E-08	1.133E-08	1.046E-08	1.114E-08	1.227E-08	1.114E-08	1.101E-08
3	7.854E-09	7.544E-09	7.335E-09	7.914E-09	7.361E-09	7.639E-09	7.695E-09	7.531E-09
4	5.441E-09	5.706E-09	5.463E-09	5.811E-09	5.474E-09	5.304E-09	5.488E-09	5.506E-09
5	4.402E-09	4.222E-09	4.387E-09	4.412E-09	4.351E-09	4.552E-09	4.413E-09	4.458E-09
6	3.520E-09	3.563E-09	3.576E-09	3.391E-09	3.587E-09	3.465E-09	3.515E-09	3.527E-09
$\overline{D_e^j}$	1.323E-08	1.296E-08	1.351E-08	1.321E-08	1.323E-08	1.280E-08	1.325E-08	1.342E-08

Tabla 4.7: Difusividades efectivas del agua y sólidos solubles para los tratamientos 5, 6, 7 y 8 durante 6 horas de proceso

t (h)	Tratamiento 05		Tratamiento 06		Tratamiento 07		Tratamiento 08	
	D_e^w ($m^2 \cdot s^{-1}$)	D_e^{ss} ($m^2 \cdot s^{-1}$)	D_e^w ($m^2 \cdot s^{-1}$)	D_e^{ss} ($m^2 \cdot s^{-1}$)	D_e^w ($m^2 \cdot s^{-1}$)	D_e^{ss} ($m^2 \cdot s^{-1}$)	D_e^w ($m^2 \cdot s^{-1}$)	D_e^{ss} ($m^2 \cdot s^{-1}$)
0.5	3.792E-08	3.682E-08	3.614E-08	4.158E-08	3.849E-08	3.214E-08	3.630E-08	4.711E-08
1	2.128E-08	2.348E-08	2.134E-08	2.074E-08	2.158E-08	2.099E-08	2.124E-08	2.110E-08
1.5	1.443E-08	1.429E-08	1.388E-08	1.484E-08	1.467E-08	1.631E-08	1.508E-08	1.342E-08
2	1.177E-08	1.095E-08	1.223E-08	1.112E-08	1.117E-08	1.161E-08	1.139E-08	1.038E-08
3	7.208E-09	7.549E-09	7.622E-09	7.537E-09	7.632E-09	7.805E-09	7.627E-09	7.612E-09
4	5.734E-09	5.628E-09	5.667E-09	5.610E-09	5.457E-09	5.678E-09	5.578E-09	5.823E-09
5	4.413E-09	4.529E-09	4.421E-09	4.479E-09	4.429E-09	3.989E-09	4.390E-09	4.228E-09
6	3.501E-09	3.429E-09	3.449E-09	3.452E-09	3.529E-09	3.641E-09	3.514E-09	3.596E-09
$\overline{D_e^j}$	1.328E-08	1.334E-08	1.309E-08	1.367E-08	1.337E-08	1.277E-08	1.314E-08	1.416E-08

Es posible afirmar que la temperatura presentó una influencia más significativa que la concentración de la solución en la difusividad efectiva del agua. Fue observado un aumento en los valores de la difusividad con la elevación de la temperatura. Este suceso puede ser atribuido a alteraciones en la estructura celular de la fruta, ocasionadas por la temperatura, resultando en una mayor velocidad de difusión.

El aumento de la concentración de la solución deshidratante presentó efectos distintos en la difusividad del agua, dependiendo de la temperatura de proceso. En la temperatura de 30°C, mayores concentraciones de glucosa y sacarosa llevaron a una pequeña disminución de los coeficientes de difusividad del agua, aunque las tasas de pérdida de agua hayan sido significativamente mayores en los ensayos utilizando mayor concentración de solución osmótica (tablas 4.6 y 4.7). Como la difusividad calculada se refiere a una media de las tasas de difusión del agua a lo largo del proceso, la tendencia es la disminución de la velocidad de difusión con el tiempo debido a la aproximación del sistema al equilibrio, provocando una reducción de los coeficientes de difusión y, así, menores valores para la difusividad media. Beristain *et al.* (1990) y Telis *et al.* (2003) y Conway (1993) también verificaron un comportamiento semejante en el estudio de los coeficientes de difusividad durante la cinética de deshidratación osmótica de piña, tomate y manzana respectivamente. Por otro lado, a 40°C, no se observó influencia

significativa de la concentración de glucosa y sacarosa en las difusividades del agua.

En el caso de los solutos, tanto la concentración de la solución como la temperatura presentaron efecto significativo en la difusión de los azúcares. La utilización de la temperatura más elevada (40°C) en la deshidratación osmótica implicó en mayores valores de las difusividades efectivas tanto para la glucosa como la sacarosa a concentración de 60°Brix, provocados por la disminución de la viscosidad de la solución, lo que fue observado por Rastogi & Raghavarao (2004) y Ochoa & Ayala (2005). Sin embargo en la otra concentración estudiada (40°Brix) fue observado un decrecimiento de la difusividad efectiva del soluto con el aumento de la temperatura debido a la menor ganancia de azúcares al largo del proceso en estas condiciones. Por otro lado, a 30°C, la difusividad de los azúcares tiende a disminuir con el aumento de la concentración de la solución deshidratante debido a la formación de la una capa espesa de azúcar alrededor de la fruta, dificultando la transferencia de masa de la solución para el producto, resultados que están de acuerdo con los autores Salvatori (1999) en trabajos similares con manzana.

Respecto a los valores de difusividades efectivas medias de la papaya (deshidratado osmóticamente) obtenido para el agua y sólidos solubles Rodriguez *et al.* (2003) reporta lo siguiente $\overline{D}_e^w = 0.314 \times 10^{-9}$ a 0.655×10^{-9} y $\overline{D}_e^{ss} = 0.107 \times 10^{-9}$ a 0.933×10^{-9} para temperaturas entre 30 – 50 °C y concentración 50 – 70 °Brix, valores que comparados con lo obtenido experimentalmente se asemeja existiendo una ligera variación, esta variación Reyes (1997) señala que todo experimentador se enfrenta al fenómeno de la variabilidad de los materiales con los cuales trabaja. Aun cuando en ellos exista cierta uniformidad, en el lugar en que se realiza el experimento se presenta la variación.

El modelo más usado es el basado en la ley difusional de Fick. Este supone que la concentración de la solución permanece constante y que la resistencia externa es despreciable frente a la resistencia interna (Raoult-Wack *et al.*, 1992). Las características de la transferencia superficial (tanto para agua como para sólidos) pueden ser relativamente pobres. Esta es la razón del uso del coeficiente D como coeficiente total o global de transferencia de masa. También para este modelo se supone que la geometría de la

muestra es simple como, por ejemplo, una placa infinita (Salvatori & Alzamora, 2000).

4.4. Efecto de las variables sobre los parámetros de la deshidratación osmótica para un tiempo de proceso de 06 horas

Con el objeto de evaluar el efecto que las tres variables en consideración tienen sobre los parámetros de la deshidratación osmótica, se realizó un diseño factorial completo 2^3 . En la tabla 4.8 se presentan el diseño factorial completo 2^3 , en las cuales se muestran los valores de los niveles de los factores estudiados y las respuestas obtenidas de ganancia de sólidos (%), pérdida de masa (%) y pérdida de agua (%) para un tiempo de proceso de 06 horas, con las corridas en forma aleatoria.

Tabla 4.8: Resumen de resultados experimentales del diseño factorial completo 2^3 en función de las variables independientes.

Std	Run	Factor 1 A: Concen tración °Brix	Factor 2 B: Tempe ratura °C	Factor 3 C: Agente Osmótico	Response 1 Ganancia de Sólidos %	Response 2 Pérdida de Masa %	Response 3 Pérdida de Agua %
5	1	60	30	Sacarosa	5.587	49.435	55.022
23	2	60	40	Glucosa	12.674	29.669	42.343
22	3	60	40	Glucosa	11.646	28.345	39.991
17	4	60	30	Glucosa	7.856	36.432	44.288
1	5	40	30	Sacarosa	9.243	20.025	29.269
7	6	40	40	Sacarosa	6.194	37.440	43.634
2	7	40	30	Sacarosa	8.494	19.149	27.643
15	8	40	30	Glucosa	10.407	15.955	26.363
9	9	40	40	Sacarosa	6.719	38.323	45.041
8	10	40	40	Sacarosa	6.509	35.014	41.523
11	11	60	40	Sacarosa	9.082	41.346	50.428
4	12	60	30	Sacarosa	4.966	42.195	47.161
24	13	60	40	Glucosa	12.331	31.188	43.520
12	14	60	40	Sacarosa	8.192	40.135	48.327
3	15	40	30	Sacarosa	8.993	21.088	30.082
16	16	60	30	Glucosa	8.522	37.195	45.716
19	17	40	40	Glucosa	8.394	31.264	39.657
13	18	40	30	Glucosa	11.750	16.210	27.960
18	19	60	30	Glucosa	8.255	33.889	42.145
14	20	40	30	Glucosa	11.079	13.686	24.765
21	21	40	40	Glucosa	7.713	29.741	37.454
20	22	40	40	Glucosa	8.167	32.592	40.759
10	23	60	40	Sacarosa	8.548	45.032	53.579
6	24	60	30	Sacarosa	5.794	47.263	53.056

4.4.1. Efecto sobre la pérdida de agua (%PA)

4.4.1.1. Efecto de los factores

En la figura 4.7 se muestra la gráfica de probabilidad normal del efecto de los factores. Montgomery (2002) afirma que todos los efectos que caen sobre la recta son insignificantes, mientras que los efectos grandes están apartados de ella; por lo tanto los efectos importantes que surgen de este análisis son los efectos principales de los factores A (concentración), B (temperatura), C (solute) y las interacciones AB y AC.

- ▲ Error estimates
- A: Concentración
- B: Temperatura
- C: Agente Osm.
- Positive Effects
- Negative Effects

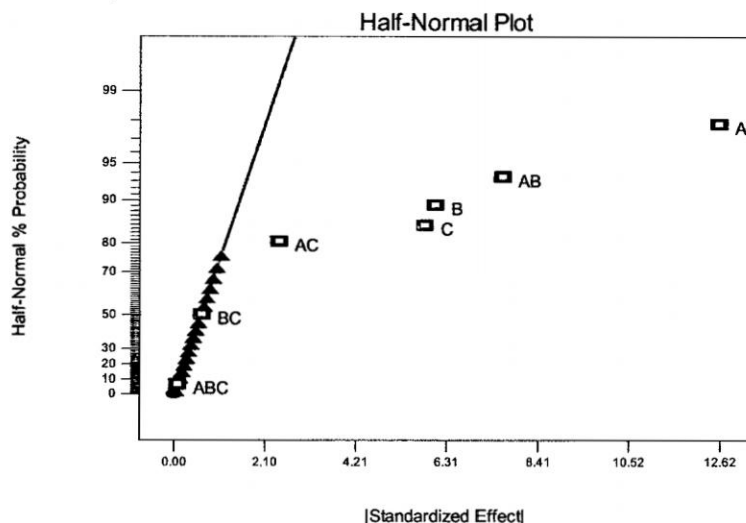


Figura 4.7: Probabilidad normal del efecto de los factores

4.4.1.2. Análisis de Varianza

La tabla 4.9 muestra los resultados del análisis de varianza realizado para el porcentaje de pérdida de agua (%PA) para un tiempo de proceso de 06 horas a un nivel de significancia de 95 %. Se observa que los efectos principales son altamente significativos (todos tienen valores de p muy pequeños) permitiéndonos afirmar que existen efectos de la concentración de solución (A), temperatura de solución (B) y agente osmótico (C) en las respuestas de pérdida de agua para los términos lineales como para los términos cuadráticos de las variables en la deshidratación osmótica de papaya. La interacción AB también tiene un efecto altamente significativo (valor de p muy pequeño); mientras la interacción AC es significativa con un nivel aproximado de 2 %, lo que indica que las variables independientes y las interacciones antes mencionadas tienen incidencia en el contenido final de humedad durante el proceso de deshidratación.

La evaluación del coeficiente de regresión (R^2) para la pérdida de agua es 95.64 % que significa una perfecta correlación positiva; mientras el coeficiente de variabilidad (CV) es de 5.49 %, la cual indica el porcentaje de error del experimento, por lo tanto el trabajo es bueno según lo manifestado en condiciones de laboratorio y parte teórica.

Tabla 4.9: Análisis de varianza de los datos de pérdida de agua

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	1764.08	7	252.01	50.10	< 0.0001	significant
<i>A-Concentración</i>	<i>955.41</i>	<i>1</i>	<i>955.41</i>	<i>189.93</i>	<i>< 0.0001</i>	
<i>B-Temperatura</i>	<i>220.74</i>	<i>1</i>	<i>220.74</i>	<i>43.88</i>	<i>< 0.0001</i>	
<i>C-Agente Osm.</i>	<i>203.02</i>	<i>1</i>	<i>203.02</i>	<i>40.36</i>	<i>< 0.0001</i>	
<i>AB</i>	<i>346.45</i>	<i>1</i>	<i>346.45</i>	<i>68.87</i>	<i>< 0.0001</i>	
<i>AC</i>	<i>35.86</i>	<i>1</i>	<i>35.86</i>	<i>7.13</i>	<i>0.0168</i>	
<i>BC</i>	<i>2.54</i>	<i>1</i>	<i>2.54</i>	<i>0.51</i>	<i>0.4873</i>	
<i>ABC</i>	<i>0.044</i>	<i>1</i>	<i>0.044</i>	<i>8.821E-003</i>	<i>0.9263</i>	
Pure Error	80.49	16	5.03			
Cor Total	1844.56	23				
	Std. Dev.	2.24		R-Squared	0.9564	
	Mean	40.82		Adj R-Squared	0.9373	
	C.V. %	5.49		Pred R-Squared	0.9018	
	PRESS	181.10		Adeq Precision	19.603	

La carta estandarizada de Pareto (figura 4.8) muestra el análisis de varianza gráficamente, la significancia que tienen las variables independientes sobre la variable dependiente. Es decir la concentración, temperatura, agente osmótico y la interacción concentración - temperatura tienen efectos altamente significativos sobre el porcentaje de pérdida de agua en la deshidratación osmótica de papaya, confirmando así los valores del análisis de varianza. La concentración de solución tiene mayor efecto, seguido de la interacción concentración - temperatura, luego temperatura y finalmente agente osmótico.

Design-Expert® Software
 Pérdida de Agua
 A: Concentración
 B: Temperatura
 C: Agente Osm.
 ■ Positive Effects
 ■ Negative Effects

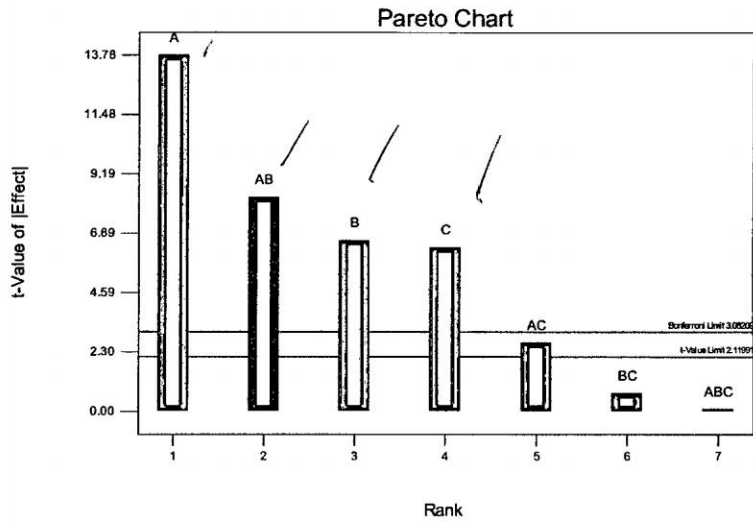


Figura 4.8: Carta estandarizada de Pareto de los datos de pérdida de agua.

4.4.1.3. Modelo de regresión para predecir la pérdida de agua

La tabla 4.10 muestra los coeficientes de regresión del modelo polinomial en términos de las estimaciones de los efectos, obtenido para la pérdida de agua (%) de la papaya durante la deshidratación osmótica.

Tabla 4.10: Coeficientes de regresión del modelo polinomial en términos de las estimaciones de los efectos

Factor	Coefficient		Standard Error
	Estimate	df	
Intercept	40.82	1	0.46
A-Concentración	6.31	1	0.46
B-Temperatura	3.03	1	0.46
C-Agente Osm.	2.91	1	0.46
AB	-3.80	1	0.46
AC	1.22	1	0.46
BC	0.33	1	0.46
ABC	-0.043	1	0.46

Analizado el efecto de los factores y sus coeficientes de regresión, se observa que los efectos importantes estadísticamente significativos son los efectos principales de los factores A (concentración), B (temperatura), C (soluto) y la interacción AB.

Los resultados del %PA durante la deshidratación de papaya se ajustaron mediante

regresión lineal múltiple en función de los factores y sus interacciones, permitiéndonos obtener el siguiente modelo para predecir la pérdida de agua.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1x_1 + \hat{\beta}_2x_2 + \hat{\beta}_3x_3 + \hat{\beta}_{12}x_1x_2 + \hat{\beta}_{13}x_1x_3 + \hat{\beta}_{23}x_2x_3 + \hat{\beta}_{123}x_1x_2x_3 \quad (4.1)$$

Donde las variables codificadas x_1 , x_2 y x_3 representan a A, B y C, respectivamente. El término x_1x_2 , x_1x_3 , x_2x_3 y $x_1x_2x_3$ son las interacciones AB, AC, BC y ABC respectivamente.

$$\hat{y} = 40,82 + 6,31x_1 + 3,03x_2 + 2,91x_3 - 3,80x_1x_2 + 1,22x_1x_3 + 0,33x_2x_3 - 0,04x_1x_2x_3 \quad (4.2)$$

Para el análisis de la respuesta se utilizó un modelo cuadrático con valores de $R^2 = 0,956$ el cual es el que mide la variabilidad de la respuesta y que está próximo a uno, y $R^2_{ajustada} = 0,902$ nos permite una mejor comparación del modelo con los diferentes variables, señalando que el modelo cuadrático que se empleó se ajusta adecuadamente al comportamiento con los datos comparados; por lo cual se le considera válidos y se pueden utilizar para predecir la pérdida de agua durante la deshidratación de papaya a las condiciones empleadas en este estudio.

Los efectos principales de A, B y C se grafica en la figura 4.9. Los tres efectos son positivos, y si solo se consideraran estos efectos principales, los tres factores se correrían en el nivel alto a fin de maximizar la pérdida de agua. Sin embargo, siempre es necesario examinar cualquier interacción que sea importante.

Observando la interacción AB, el efecto de la concentración es muy pequeño cuando la temperatura está en el nivel alto y muy grande cuando la temperatura está en el nivel bajo, obteniéndose los mejores resultados con la concentración alta y la temperatura baja. La interacción AC indica que el agente osmótico tiene un efecto reducido con una concentración baja, pero un efecto positivo grande con la concentración alta. Por lo tanto, los mejores resultados de pérdida de agua (%PA) para un tiempo de proceso de

06 horas se obtuvo cuando la concentración y el agente osmótico están en el nivel alto y la temperatura está en el nivel bajo, resultando ser 51.75 % (tabla 4.11); contrariamente se obtiene un menor valor cuando los factores están en el nivel bajo. El aumento de la concentración y el agente osmótico de la solución favorecieron la pérdida de agua en el producto por el mayor gradiente de presión osmótica en la interfaz producto/solución, proporcionando una mayor tasa de transferencia de masa. Estos resultados lo ratifica Lerici *et al.* (1989), en cuanto a la pérdida de agua, en la deshidratación osmótica de cubos de manzana y Beristain *et al.* (1990), en cuanto a la pérdida de agua, en la deshidratación osmótica de cubos de piña.

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Pérdida de Agua
 X1 = A: Concentración
 X2 = B: Temperatura
 X3 = C: Agente Osm.

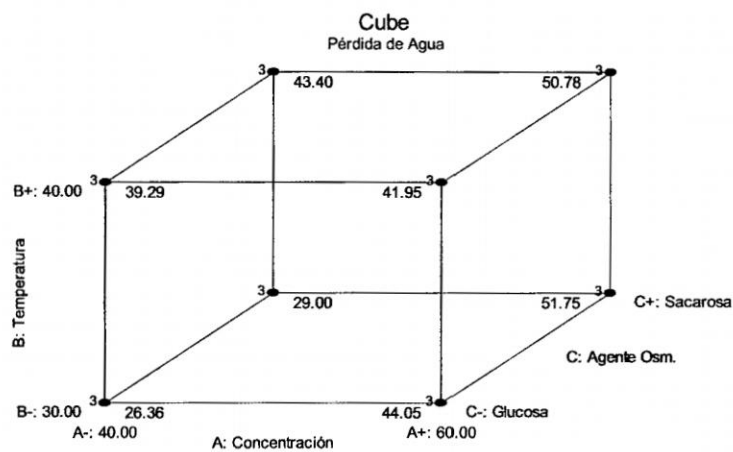


Figura 4.9: Media de la pérdida de agua en función de la temperatura, concentración y agente osmótico

Tabla 4.11: Factores y su dominio experimental para maximizar la pérdida de agua

Number	Concentración	Temperatura	Agente Osm.	%PA	Desirability	
1	<u>60.00</u>	<u>30.00</u>	<u>Sacarosa</u>	<u>51.75</u>	<u>0.89</u>	<u>Selected</u>
2	59.75	30.00	Sacarosa	51.47	0.88	
3	60.00	39.51	Sacarosa	50.83	0.86	
4	60.00	30.00	Glucosa	44.05	0.64	
5	60.00	39.82	Glucosa	41.99	0.57	

La concentración de la disolución osmótica exterior afecta en el sentido de definir la fuerza impulsora en cuanto a la transferencia de materia se refiere, así como a la viscosidad de la disolución, y de la fase líquida del alimento que va aumentando su

viscosidad a medida que se concentra, hasta alcanzar la de la disolución osmótica en el equilibrio (Barbosa-Canóvas y Vega-Mercado, 2000; Cháfer *et al.*, 2001). De igual forma, la distinta viscosidad de la disolución, y de la fase líquida del alimento que va aumentando con el tiempo del proceso tiene un efecto importante en la velocidad del transporte (Cháfer *et al.*, 2001; Barat *et al.*, 2001).

La mayor tasa de salida de agua se pudo observar principalmente en los ensayos realizados con sacarosa, consecuencia de la gran fuerza motriz existente entre la fruta y la solución hipertónica en el inicio del proceso. La naturaleza del agente osmótico es fundamental para definir el comportamiento del producto durante los procesos osmóticos de deshidratación, el tamaño de la molécula de soluto supone una mayor o menor facilidad para difundir en la estructura compleja de los distintos productos.

Se ha comprobado que la velocidad a la que sale el agua del alimento hacia la disolución concentrada es mayor que la de entrada de los sólidos solubles hacia el interior del alimento (Lenart y Lewicki, 1990; Vial *et al.*, 1991). Sin embargo, se considera que después de un cierto tiempo de tratamiento osmótico, que depende mayoritariamente de las condiciones del proceso, la permeabilidad selectiva de la membrana es destruída y el soluto puede entonces penetrar por difusión (Levi *et al.*, 1983; Heng *et al.*, 1990). Por otra parte, existe un tercer flujo, de salida de sustancias hidrosolubles propias de la fruta (azúcares, ácidos orgánicos, minerales, vitaminas, etc.) a la disolución osmótica (Peiró *et al.*, 2006).

Temperaturas comprendidas entre 20 y 40 °C son consideradas como las más óptimas porque no afectan la integridad de los tejidos, preservan la calidad nutricional del producto y son las de mayor interés a nivel económico (Sharma *et al.*, 2003). Por debajo de 40-50 °C las membranas celulares mantienen su funcionalidad limitando el transporte. Por encima de estas temperaturas la desnaturalización y la pérdida de la actividad biológica celular hacen el transporte mucho más rápido, pero tiene un efecto negativo sobre la estructura del tejido de la fruta y por tanto sobre su textura, así como sobre el sabor y el aroma (Lazarides, 1998; Barat *et al.*, 2001). Shafiur, (2003) afirma que el empleo de bajas temperaturas y elevadas concentraciones osmóticas favorece la

retención de ácidos orgánicos y nutrientes.

4.4.2. Efecto sobre la ganancia de sólidos (%GS)

4.4.2.1. Efecto de los factores

En la figura 4.10 se muestra la gráfica de probabilidad normal del efecto de los factores. Montgomery (2002) afirma que todos los efectos que caen sobre la recta son insignificantes, mientras que los efectos grandes están apartados de ella; por lo tanto los efectos importantes que surgen de este análisis son los efectos principales de los factores C (soluto), B (temperatura) y las interacciones AB, AC y ABC.

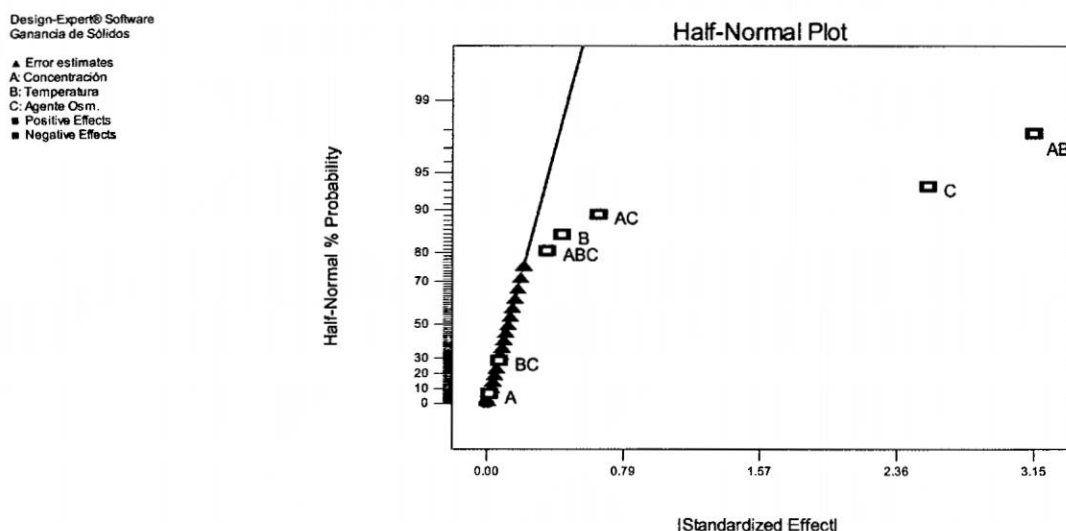


Figura 4.10: Probabilidad normal del efecto de los factores

4.4.2.2. Análisis de Varianza

La tabla 4.12 muestra los resultados del análisis de varianza realizado para el porcentaje de ganancia de sólidos (%GS) para un tiempo de proceso de 06 horas a un nivel de significancia de 95 %. Se observa que el efecto principal C (agente osmótico) es altamente significativo (tiene un valor de p muy pequeño), el factor B (temperatura de solución) es significativa con un nivel aproximado de 3 %, permitiendonos afirmar que existen efectos sobre las respuestas de ganancia de sólidos para los términos lineales como para los términos cuadráticos de las variables en la deshidratación osmótica de

papaya. Las interacciones AB y AC también tiene un efecto altamente significativo (valores de p muy pequeño), lo que indica que las variables independientes y las interacciones antes mencionadas tienen incidencia en la ganancia de sólidos durante el proceso de deshidratación.

La evaluación del coeficiente de regresión (R^2) para la ganancia de sólidos es 97.05 % que significa una perfecta correlación positiva; mientras el coeficiente de variabilidad (CV) es de 5.12 %, la cual indica el porcentaje de error del experimento, por lo tanto el trabajo es bueno según lo manifestado en condiciones de laboratorio y parte teórica.

Tabla 4.12: Análisis de varianza de los datos de ganancia de sólidos

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	102.52	7	14.65	75.16	< 0.0001	significant
<i>A-Concent.</i>	<i>1.820E-003</i>	<i>1</i>	<i>1.820E-003</i>	<i>9.339E-003</i>	<i>0.9242</i>	
<i>B-Temperat.</i>	<i>1.14</i>	<i>1</i>	<i>1.14</i>	<i>5.83</i>	<i>0.0281</i>	
<i>C-Agente Osm.</i>	<i>38.69</i>	<i>1</i>	<i>38.69</i>	<i>198.54</i>	<i>< 0.0001</i>	
<i>AB</i>	<i>59.42</i>	<i>1</i>	<i>59.42</i>	<i>304.90</i>	<i>< 0.0001</i>	
<i>AC</i>	<i>2.51</i>	<i>1</i>	<i>2.51</i>	<i>12.87</i>	<i>0.0025</i>	
<i>BC</i>	<i>0.033</i>	<i>1</i>	<i>0.033</i>	<i>0.17</i>	<i>0.6865</i>	
<i>ABC</i>	<i>0.73</i>	<i>1</i>	<i>0.73</i>	<i>3.77</i>	<i>0.0701</i>	
Pure Error	3.12	16	0.19			
Cor Total	105.64	23				
	Std. Dev.	0.44		R-Squared	0.9705	
	Mean	8.63		Adj R-Squared	0.9576	
	C.V. %	5.12		Pred R-Squared	0.9336	
	PRESS	7.02		Adeq Precision	26.555	

La carta estandarizada de Pareto (figura 4.11) muestra el análisis de varianza gráficamente, la significancia que tienen las variables independientes sobre la variable dependiente. Es decir el agente osmótico, interacción concentración - temperatura y la interacción concentración - agente osmótico tienen efectos altamente significativos sobre el porcentaje de ganancia de sólidos en la deshidratación osmótica de papaya, confirmando así los valores del análisis de varianza. La interacción concentración - temperatura tiene mayor efecto, seguido del agente osmótico y finalmente la interacción

concentración - agente osmótico.

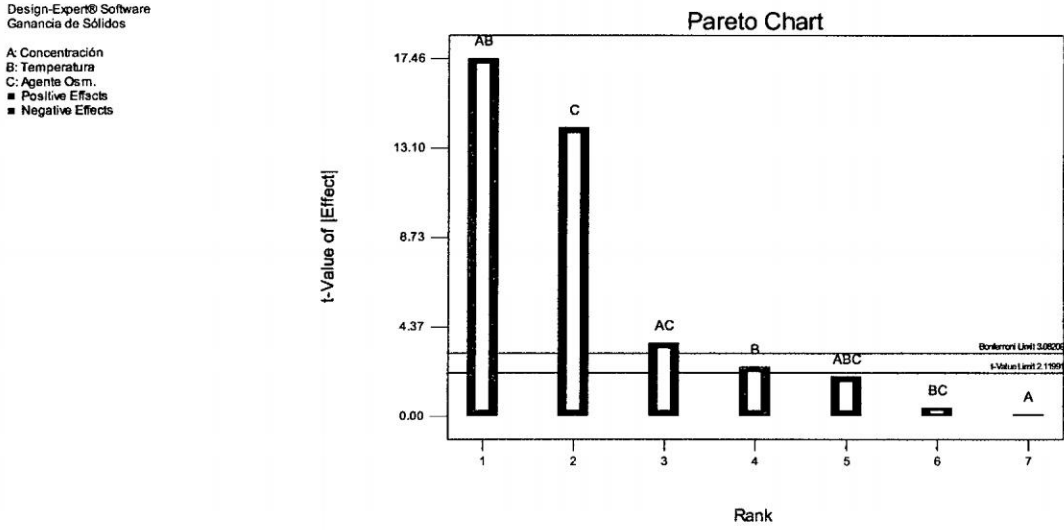


Figura 4.11: Carta estandarizada de Pareto de los datos de ganancia de sólidos.

4.4.2.3. Modelo de regresión para predecir la ganancia de sólidos

La tabla 4.13 muestra los coeficientes de regresión del modelo polinomial en términos de las estimaciones de los efectos, obtenido para la ganancia de sólidos (%) de la papaya durante la deshidratación osmótica.

Tabla 4.13: Coeficientes de regresión del modelo polinomial en términos de las estimaciones de los efectos

Factor	Coefficient		Standard Error
	Estimate	df	
Intercept	8.63	1	0.09
A-Concentración	-8.71E-03	1	0.09
B-Temperatura	0.22	1	0.09
C-Agente Osm.	-1.27	1	0.09
AB	1.57	1	0.09
AC	-0.32	1	0.09
BC	-0.037	1	0.09
ABC	-0.17	1	0.09

Analizado el efecto de los factores y sus coeficientes de regresión, se observa que los efectos importantes estadísticamente significativos son el efecto principal del factor C (soluto) y las interacciones AB y AC.

Los resultados del %GS durante la deshidratación de papaya se ajustaron mediante regresión lineal múltiple en función de los factores y sus interacciones, permitiéndonos obtener el siguiente modelo para predecir la ganancia de sólidos.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1x_1 + \hat{\beta}_2x_2 + \hat{\beta}_3x_3 + \hat{\beta}_{12}x_1x_2 + \hat{\beta}_{13}x_1x_3 + \hat{\beta}_{23}x_2x_3 + \hat{\beta}_{123}x_1x_2x_3 \quad (4.3)$$

Donde las variables codificadas x_1 , x_2 y x_3 representan a A, B y C, respectivamente. El término x_1x_2 , x_1x_3 , x_2x_3 y $x_1x_2x_3$ son las interacciones AB, AC, BC y ABC respectivamente.

$$\hat{y} = 8,63 - 8,71 \times 10^{-3}x_1 + 0,22x_2 - 1,27x_3 + 1,57x_1x_2 - 0,32x_1x_3 - 0,04x_2x_3 - 0,17x_1x_2x_3 \quad (4.4)$$

Para el análisis de la respuesta se utilizó un modelo cuadrático con valores de $R^2 = 0,971$ el cual es el que mide la variabilidad de la respuesta y que está próximo a uno, y $R^2_{ajustada} = 0,958$ nos permite una mejor comparación del modelo con los diferentes variables, señalando que el modelo cuadrático que se empleó se ajusta adecuadamente al comportamiento con los datos comparados; por lo cual se le considera válidos y se pueden utilizar para predecir la ganancia de sólidos durante la deshidratación de papaya a las condiciones empleadas en este estudio.

Los efectos principales de A, B y C se grafica en la figura 4.12. Los tres efectos son negativos, y si solo se consideraran estos efectos principales, los tres factores se correrían en el nivel bajo a fin de minimizar la ganancia de sólidos. Sin embargo, siempre es necesario examinar cualquier interacción que sea importante.

Observando la interacción AB, el efecto de la concentración es grande cuando la temperatura está en el nivel alto y pequeño cuando la temperatura está en el nivel bajo, obteniéndose los mayores resultados con la concentración y la temperatura baja en el nivel alto (la temperatura más alta altera la permeabilidad de la membrana celular, permitiendo un mayor ingreso de soluto para la fruta). La interacción AC indica que

el agente osmótico tiene un efecto reducido con una concentración alta, pero un efecto positivo grande con la concentración baja. Por lo tanto, los menores resultados de ganancia de sólidos (%GS) para un tiempo de proceso de 06 horas se obtuvo cuando el agente osmótico y la concentración está en el nivel alto y la temperatura está en el nivel bajo, resultando ser 5.45 % (tabla 4.14); contrariamente se obtiene un menor valor cuando los factores están en el nivel contrario a lo mencionado anteriormente. La sacarosa presenta peso molecular relativamente mayor que la glucosa, posibilitando una mayor tasa de pérdida de agua y una ganancia de sólidos reducido; el efecto de la concentración de la solución osmótica en la ganancia de sólidos, se notó que soluciones más concentradas limitan la entrada de sólidos en el producto por la formación de una capa superficial de azúcar alrededor de la fruta. Sanjinez-Argandoña (1999), Talens *et al.* (2002) y Giraldo *et al.* (2003) también observaron este comportamiento en sus estudios con guayabas, kiwis y mangos, respectivamente.

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Ganancia de Sólidos
 X1 = A: Concentración
 X2 = B: Temperatura
 X3 = C: Agente Osm.

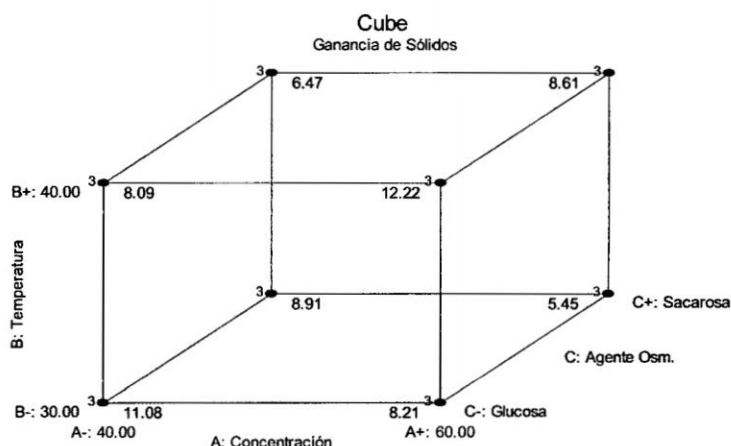


Figura 4.12: Media de la ganancia de sólidos en función de la temperatura, concentración y agente osmótico

Tabla 4.14: Factores y su dominio experimental para minimizar la ganancia de solutos

Number	Concentración	Temperatura	Agente Osm.	%GS	Desirability	
1	<u>60.00</u>	<u>30.00</u>	<u>Sacarosa</u>	<u>5.45</u>	<u>0.94</u>	<u>Selected</u>
2	60.00	30.15	Sacarosa	5.50	0.93	
3	40.00	40.00	Sacarosa	6.47	0.80	
4	40.00	40.00	Glucosa	8.09	0.60	
5	60.00	30.00	Glucosa	8.21	0.58	

El agua puede difundirse más fácilmente que los solutos a través de la membrana celular siendo el coeficiente de difusión del agua mayor que el de los azúcares (glucosa, sacarosa, fructosa, etc) en un rango de temperaturas entre 45 y 70 °C (Sablani y Rahman, 2003).

La pared celular compleja de la estructura del alimento actúa como una membrana semipermeable, la cual no es completamente selectiva, resultando dos flujos de transferencia de masa: la difusión de agua del alimento a la solución y la difusión del soluto de la solución al alimento (Rastogi y Raghavarao, 1990), el agua puede pasar libremente a través de la membrana celular, mientras que otros componentes de la disolución lo harán mucho más lentamente (Torreggiani, 1993). Si se tienen membranas de este tipo se puede observar que las moléculas que no penetran al interior del tejido forman una capa de soluto concentrado en la superficie de un espesor aproximado de 3 mm (Raoult-Wack *et al.*, 1991), la cual puede promover la remoción de agua y regular su impregnación. El flujo de componentes de una fase a otra ocurre de forma espontánea hasta alcanzar la igualdad de potenciales químicos de los diferentes componentes en el sistema. De esta forma se consigue el principal objetivo de cualquier técnica de deshidratación, extender la vida útil del producto mediante una disminución del contenido de humedad, reduciendo así la actividad del agua y como consecuencia el crecimiento microbiano y la actividad enzimática, factores que provocan el deterioro de los alimentos (Fellows, 1988). La transferencia de solutos intracelulares está muy impedida al comienzo del proceso por la permeabilidad de las membranas, al igual que la de los solutos de la OS (disolución osmótica) que penetrarán principalmente por capilaridad en los poros (espacios intercelulares del tejido) y en cierta medida por difusión a través de la fase líquida intercelular del tejido. Se ha comprobado que la velocidad a la que sale el agua del alimento hacia la disolución concentrada es mayor que la de entrada de los sólidos solubles hacia el interior del alimento (Lenart y Lewicki, 1990; Ayala, 2001), por lo que la presión osmótica de la disolución será, por tanto, la fuerza impulsora predominante hacia el equilibrio al comienzo del proceso. Además se considera que después de un cierto tiempo de tratamiento osmótico, que depende mayoritariamente

de las condiciones del proceso, la permeabilidad selectiva de la membrana es destruida y el soluto puede entonces penetrar por difusión. En algunos trabajos se ha visto que en el caso del mango, después de 60 min de tratamiento, el diámetro de los poros del tejido celular se reduce drásticamente, con lo cual, se ve reducida la movilidad de moléculas relativamente grandes como es el caso de la sacarosa (Ayala, 2001).

4.4.3. Efecto sobre la pérdida de masa (%PP)

4.4.3.1. Efecto de los factores

En la figura 4.13 se muestra la gráfica de probabilidad normal del efecto de los factores. Montgomery (2002) afirma que todos los efectos que caen sobre la recta son insignificantes, mientras que los efectos grandes están apartados de ella; por lo tanto los efectos importantes que surgen de este análisis son los efectos principales de los factores A (concentración), B (temperatura), C (soluto) y las interacciones AB y AC.

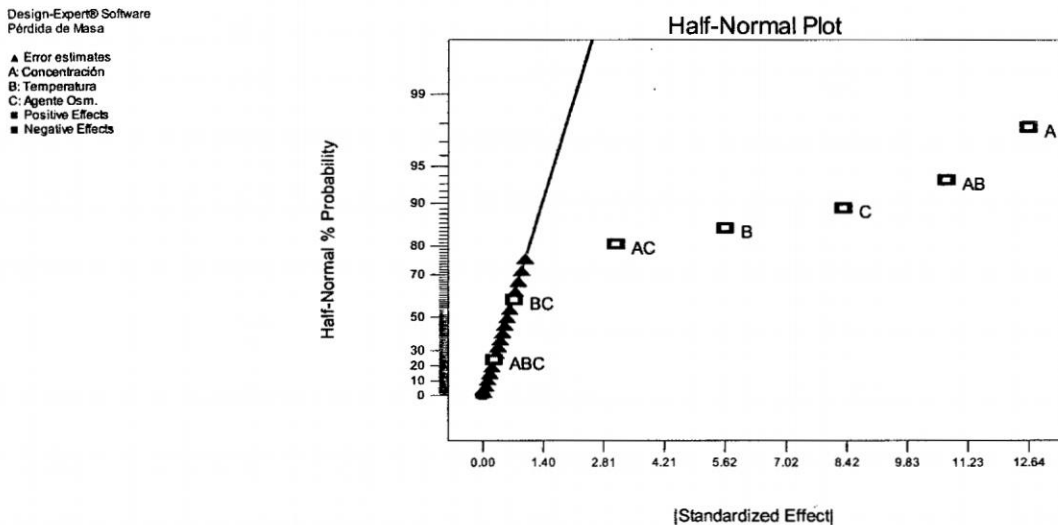


Figura 4.13: Probabilidad normal del efecto de los factores

4.4.3.2. Análisis de Varianza

La tabla 4.15 muestra los resultados del análisis de varianza realizado para el porcentaje de pérdida de masa (%PP) para un tiempo de proceso de 06 horas a un nivel de significancia de 95 %. Se observa que los efectos principales son altamente significativos

(todos tienen valores de p muy pequeños) permitiéndonos afirmar que existen efectos de la concentración de solución (A), temperatura de solución (B) y agente osmótico (C) en las respuestas de pérdida de masa para los términos lineales como para los términos cuadráticos de las variables en la deshidratación osmótica de papaya. La interacción AB también tiene un efecto altamente significativo (valor de p muy pequeño); mientras la interacción AC es significativa con un nivel aproximado de 0.2%, lo que indica que las variables independientes y las interacciones antes mencionadas tienen incidencia en la pérdida de masa durante el proceso de deshidratación.

La evaluación del coeficiente de regresión (R^2) para la pérdida de masa es 97.22% que significa una perfecta correlación positiva; mientras el coeficiente de variabilidad (CV) es de 6.33%, la cual indica el porcentaje de error del experimento, por lo tanto el trabajo es bueno según lo manifestado en condiciones de laboratorio y parte teórica.

Tabla 4.15: Análisis de varianza de los datos de pérdida de masa

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	2321.10	7	331.59	79.96	< 0.0001	significant
A-Concentración	958.07	1	958.07	231.04	< 0.0001	
B-Temperatura	190.22	1	190.22	45.87	< 0.0001	
C-Agente Osm.	418.99	1	418.99	101.04	< 0.0001	
AB	692.89	1	692.89	167.09	< 0.0001	
AC	57.34	1	57.34	13.83	0.0019	
BC	3.16	1	3.16	0.76	0.3959	
ABC	0.42	1	0.42	0.10	0.7551	
Pure Error	66.35	16	4.15			
Cor Total	2387.44	23				
	Std. Dev.	2.04		R-Squared	0.9722	
	Mean	32.19		Adj R-Squared	0.9601	
	C.V. %	6.33		Pred R-Squared	0.9375	
	PRESS	149.28		Adeq Precision	26.379	

La carta estandarizada de Pareto (figura 4.14) muestra el análisis de varianza gráficamente, la significancia que tienen las variables independientes sobre la variable dependiente. Es decir la concentración, temperatura, agente osmótico, interacción con-

concentración - temperatura y la interacción concentración - agente osmótico tienen efectos altamente significativos sobre el porcentaje de pérdida de masa en la deshidratación osmótica de papaya, confirmando así los valores del análisis de varianza. La concentración de solución tiene mayor efecto, seguido de la interacción concentración - temperatura, luego agente osmótico, temperatura y finalmente la interacción concentración - agente osmótico.

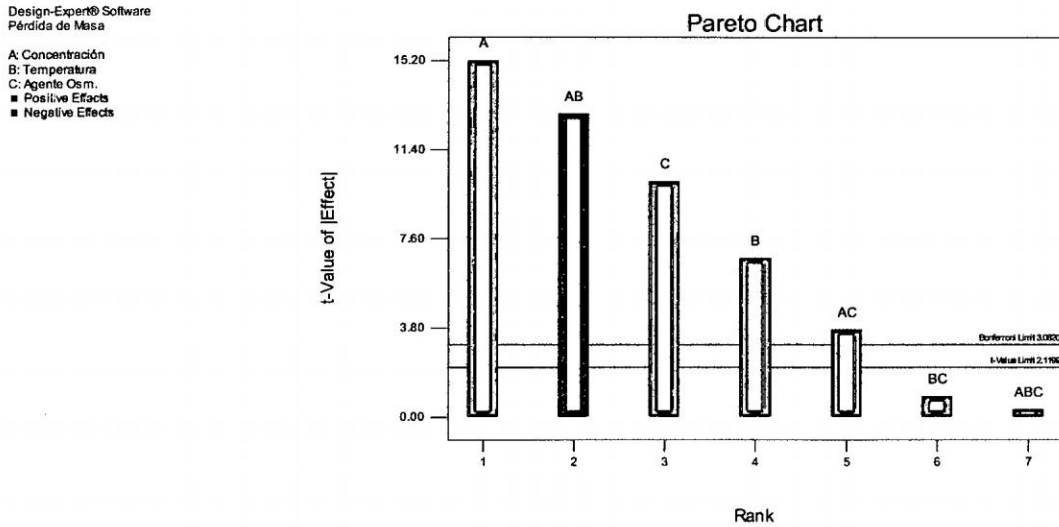


Figura 4.14: Carta estandarizada de Pareto de los datos de pérdida de masa.

4.4.3.3. Modelo de regresión para predecir la pérdida de agua

La tabla 4.16 muestra los coeficientes de regresión del modelo polinomial en términos de las estimaciones de los efectos, obtenido para la pérdida de masa (%) de la papaya durante la deshidratación osmótica.

Tabla 4.16: Coeficientes de regresión del modelo polinomial en términos de las estimaciones de los efectos

Factor	Coefficient		Standard
	Estimate	df	Error
Intercept	32.19	1	0.42
A-Concentración	6.32	1	0.42
B-Temperatura	2.82	1	0.42
C-Agente Osm.	4.18	1	0.42
AB	-5.37	1	0.42
AC	1.55	1	0.42
BC	0.36	1	0.42
ABC	0.13	1	0.42

Analizado el efecto de los factores y sus coeficientes de regresión, se observa que los efectos importantes estadísticamente significativos son los efectos principales de los factores A (concentración), B (temperatura), C (soluto) y las interacciones AB, AC.

Los resultados del %PP durante la deshidratación de papaya se ajustaron mediante regresión lineal múltiple en función de los factores y sus interacciones, permitiéndonos obtener el siguiente modelo de regresión para predecir la pérdida de masa.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1x_1 + \hat{\beta}_2x_2 + \hat{\beta}_3x_3 + \hat{\beta}_{12}x_1x_2 + \hat{\beta}_{13}x_1x_3 + \hat{\beta}_{23}x_2x_3 + \hat{\beta}_{123}x_1x_2x_3 \quad (4.5)$$

Donde las variables codificadas x_1 , x_2 y x_3 representan a A, B y C, respectivamente. El término x_1x_2 , x_1x_3 , x_2x_3 y $x_1x_2x_3$ son las interacciones AB, AC, BC y ABC respectivamente.

$$\hat{y} = 32,19 + 6,32x_1 + 2,82x_2 + 4,18x_3 - 5,37x_1x_2 + 1,55x_1x_3 + 0,36x_2x_3 + 0,13x_1x_2x_3 \quad (4.6)$$

Para el análisis de la respuesta se utilizó un modelo cuadrático con valores de $R^2 = 0,972$ el cual es el que mide la variabilidad de la respuesta y que está próximo a uno, y $R^2_{ajustada} = 0,960$ nos permite una mejor comparación del modelo con los diferentes variables, señalando que el modelo cuadrático que se empleó se ajusta adecuadamente

al comportamiento con los datos comparados; por lo cual se le considera válidos y se pueden utilizar para predecir la pérdida de agua durante la deshidratación de papaya a las condiciones empleadas en este estudio.

Los efectos principales de A, B y C se grafica en la figura 4.15. Los tres efectos son positivos, y si solo se consideraran estos efectos principales, los tres factores se correrían en el nivel alto a fin de maximizar la pérdida de agua. Sin embargo, siempre es necesario examinar cualquier interacción que sea importante.

Observando la interacción AB, el efecto de la concentración es muy pequeño cuando la temperatura está en el nivel alto y muy grande cuando la temperatura está en el nivel bajo, obteniéndose los mejores resultados con la concentración alta y la temperatura baja. La interacción AC indica que el agente osmótico tiene un efecto reducido con una concentración baja, pero un efecto positivo grande con la concentración alta. Por lo tanto, los mejores resultados de pérdida de masa (%PP) para un tiempo de proceso de 06 horas se obtuvo cuando la concentración y el agente osmótico están en el nivel alto y la temperatura está en el nivel bajo, resultando ser 46.30 % (tabla4.17); contrariamente se obtiene un menor valor cuando los factores están en el nivel contrario a lo mencionado anteriormente. Raoult *et al.* (1989) trabajando con manzanas en forma de cilindros y láminas delgadas reportan que la pérdida de peso disminuye durante la deshidratación osmótica, lo cual concuerda con las tendencias obtenidas en este trabajo. Similares resultados en cuanto a la pérdida de peso considerando geometría de frutas y efecto de temperatura, fueron encontrados y publicados por Beristain *et al.* (1990).

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Pérdida de Masa
 X1 = A: Concentración
 X2 = B: Temperatura
 X3 = C: Agente Osm.

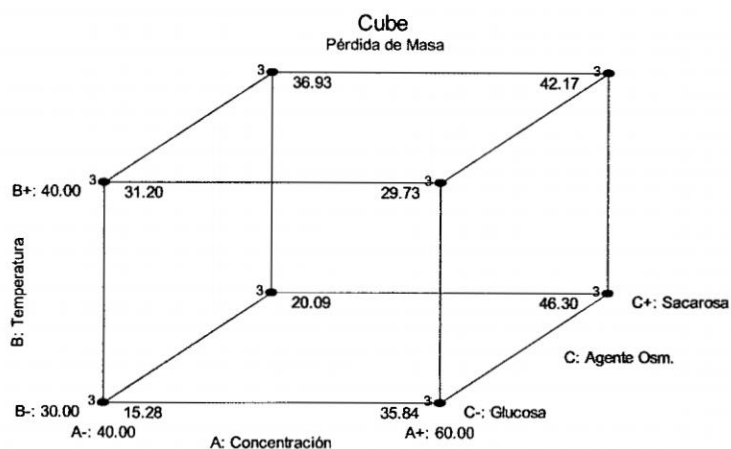


Figura 4.15: Media de la pérdida de masa en función de la temperatura, concentración y agente osmótico

Tabla 4.17: Factores y su dominio experimental para maximizar la pérdida de masa

Number	Concentración	Temperatura	Agente Osm.	%PP	Desirability	
1	<u>60.00</u>	<u>30.00</u>	<u>Sacarosa</u>	<u>46.30</u>	<u>0.91</u>	<u>Selected</u>
2	60.00	32.09	Sacarosa	45.44	0.89	
3	60.00	34.91	Sacarosa	44.27	0.86	
4	60.00	30.00	Glucosa	35.84	0.62	
5	40.00	40.00	Glucosa	31.20	0.49	

El efecto negativo de la concentración de solutos sobre el %PP se explica por que cuando la concentración de la solución aumenta por encima de un cierto valor, la entrada de sólidos comienza a ser significativa y la utilización de tiempos prolongados en el proceso, permiten que se alcance un periodo en el que la salida de agua puede sufrir una desaceleración, pero la entrada de sólidos puede continuar, afectando el valor de %PP (Lenard y Flink, 1984).

Por otra parte algunos investigadores, trabajando con papa en soluciones de azúcar y sal, han encontrado que la pérdida de agua es directamente proporcional a la concentración inicial en la solución en un rango de 20-70 % (Lenard y Flink, 1984).

Rastogi y Raghavarao (1996) afirman que la deshidratación osmótica consiste en la extracción de agua de un producto que se sumerge en una disolución hipertónica a un tiempo y temperatura específicos. Esta extracción se debe a la fuerza impulsora que se

crea por la alta presión osmótica (o baja actividad de agua) de la disolución o por el gradiente de concentración entre la disolución y el sólido.

Las variables que afectan la transferencia de masa durante la OD son: la concentración y la temperatura de la disolución osmótica, el tiempo de inmersión, la estructura (porosidad) del material, la geometría (tamaño, forma y área superficial), la composición de la disolución (peso molecular y naturaleza del soluto), la presión (vacío o atmosférica), el nivel de agitación, la relación disolución-producto y el pretratamiento del producto (Rastogi y Raghavarao, 1996).

La concentración de la disolución osmótica exterior afecta en el sentido de definir la fuerza impulsora en cuanto a la transferencia de materia se refiere, así como a la viscosidad de la disolución, y de la fase líquida del alimento que va aumentando su viscosidad a medida que se concentra, hasta alcanzar la de la disolución osmótica en el equilibrio (Barbosa-Canóvas y Vega-Mercado, 2000; Cháfer *et al.*, 2001). De igual forma, la distinta viscosidad de la disolución, y de la fase líquida del alimento que va aumentando con el tiempo del proceso tiene un efecto importante en la velocidad del transporte (Cháfer *et al.*, 2001; Barat *et al.*, 2001).

Conclusiones

- Las variables concentración de solución, temperatura de solución y agente osmótico, afectan de forma significativa los parámetros cinéticos (%PA, %GS y %PP) en la deshidratación osmótica de papaya.
- La relación entre las variables y los parámetros cinéticos y difusionales no es lineal, por lo cual se pueden encontrar combinaciones de los valores de estas variables que producen valores máximos y mínimos para los parámetros, permitiendo obtener mejores resultados en el proceso global de deshidratación osmótica.
- En el proceso de deshidratación osmótica de papaya, bajo las condiciones del presente trabajo, los cambios más importantes se presentan en las primeras 4 horas de proceso, después de las cuales los cambios de humedad, contenido de sólidos solubles y peso se desarrollan más lentamente, indicando que el sistema se está aproximando al equilibrio.
- Los resultados experimentales mostraron que la papaya deshidratada osmóticamente con solución de sacarosa presentó simultáneamente, mayores tasas de pérdida de agua y menor incorporación de sólidos a lo largo del tiempo en relación al procesado con glucosa, consecuencia de las diferencias de peso molecular de los dos solutos.
- La utilización de las condiciones óptimas encontradas en este trabajo para la deshidratación osmótica de papaya en forma de cubos, permitió obtener un %PA de 51.75 % y un %PP de 46.30 % como valores máximos en un periodo de 6 horas; y un %GS de 5,45 % como valor mínimo en un periodo de 6 horas.

- La optimización del modelo obtenido del diseño factorial completo 2^3 , para las condiciones del presente trabajo, se tiene como valores de las variables para unas respuestas máximas, una concentración de solución de 60 °Brix, temperatura de solución de 30 °C y como agente osmótico, Sacarosa.
- El modelo matemático de difusión fue capaz de predecir la cinética de transferencia de masa en la deshidratación osmótica de papaya en forma de cubos, permitiendo determinar experimentalmente valores de difusividad efectiva, tanto para el agua como para los solutos a diferentes tiempos de proceso. Los valores de difusividad efectiva media ($\overline{D_e^j}$), para los valores de variables óptimas fueron: $\overline{D_e^w} = 1,309E - 08 \frac{m^2}{s}$ y $\overline{D_e^s} = 1,367E - 08 \frac{m^2}{s}$.

Recomendaciones

- La papaya obtenida por este método de deshidratación, es un producto de humedad intermedia; por lo tanto requiere la aplicación de una técnica adicional de conservación para garantizar la estabilidad del producto (tecnología de barreras múltiples).
- Realizar trabajos de investigación sobre la vida útil de trozos de papaya deshidratados osmóticamente.
- Desarrollar estudios para evaluar y analizar la composición nutricional de los trozos de papaya deshidratados osmóticamente.
- Realizar trabajos de investigación evaluando los otros factores que afectan a la deshidratación osmótica.
- Realizar un estudio de pre-factibilidad para instalar una planta frutas deshidratadas osmóticamente.

Bibliografía

- [1] AGUADO, J.; CALLES, J.; CAÑIZARES, P.; LÓPEZ, B.; SANTOS, A.; SERRANO, D. (2003). Ingeniería de la industria alimentaria, vol. III – Operaciones de conservación de alimentos. Editorial Síntesis S.A. Madrid, España. p. 151-192.
- [2] AGUIRRE, C.; FERNANDEZ, V. (1996). El sabor de la papaya. Campo y Tecnología. N^o 26, May/Jun. Colombia.
- [3] ALZAMORA, S.M., GERSCHENSON, L.N., VIDALES, S.L., NIETO, A. (1997). Cambios estructurales en el procesamiento mínimo de frutas: Algunos efectos del blanqueo y de la impregnación del azúcar. Food Engineering 2000. Ed. International Thomson, New York, pp. 117-139.
- [4] A.O.A.C., 1998 (Association of official analytical chemists official Methods of Analysis of Association of Analytical chemists). Washington.
- [5] ARGAIZ, A.J. (1988). Alternativas de proceso para frutos tropicales. Memorias de simposio nacional de fisiología de productos hortícolas en México. Ed. Limusa (8-10) 12 pp. 153-163.
- [6] ARTÉS, F.; MARTÍNEZ, J.A.; MARÍN, J.G. (1999). Quality changes in minimally processed Romaine lettuce as affected by several treatments. The Royal Society of Chemistry. London U.K. 115-118.
- [7] AYALA, A. (2001). Aplicación de la deshidratación osmótica y la impregnación a vacío en la crioprotección de mango. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

- [8] AZUARA, E., BERISTAIN, C.I., GARCÍA, H.S. (1992). Development of a Mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. *Journal of Food Science and Technology* 29(4), 239-242.
- [9] BARBOSA-CÁNOVAS G.; VEGA-MERCADO, H. (2000). Deshidratación de alimentos. Editorial Acribia S.A. Zaragoza. España. p. 235-255.
- [10] BARRERA, C., BETORET, N., FITO, P. (2004). Influencia de Ca^{2+} y de Fe^{2+} en la cinética de deshidratación osmótica de rebanadas de manzana (var. Granny Smith). *Journal of Food Engineering*, 65(1): p. 9-14.
- [11] BARREIRO, M. (1999). Papaya y maíz. Claridades agropecuarias, N^o 67. México, D.F.
- [12] BATTY, J.; FOLKMAN, S. (1989). Fundamentos de la ingeniería de alimentos. Compañía editorial Continental S.A. México (D.F.). p. 258-274.
- [13] BEREITER, M. (2001). Efecto de la osmodeshidratación y congelamiento en las cualidades de calidad del fruto de kiwi. Trabajo Final de Carrera. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- [14] BIOEXTRACTO. (2003). Boletín 70 Papaya (Carica papaya L.). México, D.F. p. 15-25.
- [15] BIRD, R.; STEWART, W.; LIGHTFOOT, E. (1992). Fenómenos de transporte. Editorial Reverté, S.A., Barcelona, España. p. 18-6, 19-2.
- [16] BOLIN, H.R.; HUXSOLL, C.C.; JACKSON, R.; NG, K.C. (1983). Efecto de agentes osmóticos y de la concentración en la calidad de fruta. *Journal of Food Science*. 48, p. 202-205.
- [17] BRENNAN, J.; BUTTERS, J.; COWELL, N.; LILLEY, A. (1998). Las operaciones de la ingeniería de alimentos. 3ra Edición. Ed. Acribia S.A. Zaragoza, España. p. 377-389.

- [18] CASTRO, D.; BARAT, J.; FITO, P.; BOYS, T. (1999) Evaluación energética y costes de la deshidratación osmótica. Dpto. de Tecnología de alimentos, UPV. Alimentación Equipos y Tecnología, v. 35 p. 83-89.
- [19] CEBALLOS, G. (2005). Estudios en papaya mínimamente procesada por deshidratación osmótica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- [20] CHÁFER, M.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C.; ORTOLÁ, M.D.; CHIRALT, A.; FITO, P. (2001). Kinetics of osmotic dehydration in orange and mandarin peels. *Journal of Food Process Engineering*. 24, 273-289.
- [21] CHIRALT, A., MARTÍNEZ-NAVARRETE, N., MARTÍNEZ-MONZÓ, J., TALENS, P., MORAGA, G., AYALA, A., FITO, P. (2001). Cambios en las propiedades mecánicas a través de procesos osmóticos. *Journal of Food Engineering*, 49(2-3): 129-135.
- [22] COCHRAN, W.; COX, G. (1995). Diseños experimentales. Editorial Trillas S.A., México. p. 177, 214.
- [23] COLLAZOS, CH. (1996). Tablas peruanas de composición de alimentos. Ministerio de salud, centro nacional de alimentación y nutrición, 7ma edición. Lima, Perú.
- [24] COLOMER, Y.; IBARZ, A. (1994). Tecnologías osmóticas, Aplicación en los procesos de deshidratación de frutas. Dpto. de Tecnología de los Alimentos. E.T.S.E. Agraria de Lérida Universidad de Lérida. p. 102-110.
- [25] CONWAY J., CASTAIGNE, F., PICARD, G., VOVAN, X. (1983). Mass transfer consideration in the osmotic dehydration of apples. *Instituto Canadiense Food Science Technology Journal*, 16: 25-29.
- [26] COULTATE, T. (1986). Alimentos. Química de sus componentes. Editorial Acribia. S.A. Zaragoza – España.
- [27] CRANK, J. (1975). Las matemáticas de la difusión. Segunda edición, prensa de la universidad: Oxford. Gran Bretaña. Inglaterra. p. 9-61.

- [28] ESCRICHE, I., CHIRALT, A., MORENO, J., SERRA, J. A. (2000). Influencia del blanqueo – tratamientos de deshidratación osmótica en la fracción volátil de fresas. *Journal of Food Science*, 65(7): 1107-1111.
- [29] EARLE, R. (1979). *Ingeniería de los alimentos*. Editorial Acribia, Zaragoza. España. p.74-77.
- [30] FELLOWS, P. (1994). *Tecnología del Procesado de Alimentos*. Editorial Acribia. España. p. 150-154.
- [31] FENEMA, O. (1996). *Química de los alimentos*. Editorial Acribia, Zaragoza. España. p. 81-100.
- [32] FITO, P., CHIRALT, A., BARAT, J.M., MARTÍNEZ-MONZÓ, J. (2000). Impregnación de vacío en el procesamiento de frutas. *Tendencias en la ingeniería de alimentos*. Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, Pennsylvania, USA, p. 149-163.
- [33] FLORES, E. 1977. *Deshidratación de Frutas por Ósmosis: Piña: Efectos de Bisulfito, Temperatura y Tipo de Edulcorantes*. p. 14-20.
- [34] FORNI, E.; SORMANI, A.; SCALISE, S.; TORREGGIANI, D. (1997). La influencia de la composición de azúcar en la estabilidad de color de los albaricoques osmodeshidratados. *Food Research International*, v. 30, p. 87-94.
- [35] FOUST, J. (1999). *Principios de operaciones unitarias*, 2da Edición, compañía editorial continental, S.A. Pensilvania. p. 202-208.
- [36] GEANKOPLIS, C. (1993). *Procesos de transporte y Operaciones Unitarias*. Compañía editorial Continental S.A. México (D.F.). p. 425-461.
- [37] GIANGIACOMO, R., TORREGGIANI, D., ABBO, E. (1987). Deshidratación osmótica de frutas. *Journal of Food Processing and Preservation*, 11(3): p. 183-195.

- [38] GIRALDO, G.; TALENS, P.; FITO, B.; CHIRALT, A. (2003). Influence of Sucrose Solution Concentration on Kinetics and Yield during Osmotic Dehydration of Mango. *Journal of Food Engineering*, v. 58, p. 33-43.
- [39] GONZALES-MARTINEZ, C.; CHIRALT, A.; ALTARES, A. (2005) Papel de la membrana celular durante la deshidratación osmótica de tejido vegetal. Dpto. de Tecnología de alimentos, UPV. *Alimentación Equipos y Tecnología*, v. 42 p. 87-90.
- [40] GUZMÁN, G. (1998). *Guía para el cultivo de la Papaya (Carica papaya L.)* San José, Costa rica.
- [41] HAYES G.D. (1992). *Manual de datos para la ingeniería de alimentos*. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza. España. p. 68-69.
- [42] HART, L.; FISHER, H. (1991). *Análisis moderno de los alimentos*. 2^o reimpresión. Editorial Acribia S.A. Zaragoza. España.
- [43] IBARZ A.; BARBOZA G.; GARZA, S.; GIMENO, V. (2000). *Métodos experimentales en la Ingeniería Alimentaria*. Editorial Acribia S.A. Zaragoza. España. p. 95-122.
- [44] IBARZ, A.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. (2005). *Operaciones unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. Editorial Acribia S.A. Zaragoza. España. p. 621-623.
- [45] INFOAGRO. (2002). *El cultivo de la papaya*. Colombia. p. 15-55.
- [46] KALRA, S.K.; TANDOM, D.K.; SINGH, B.P. (1995). Papaya. En U.T. Desai y A. N. Wagh (Eds.), *Manual de la ciencia y de la tecnología de la fruta*. (p. 297-310). New York: Marcel Dekker Inc.
- [47] LAZARIDES, H. N.; KATSANIDIS, E.; NICKOLAIDIS, A. (1995). Mass Transfer Kinetics during Osmotic Preconcentration Aiming at Minimal Solid Uptake. *Journal of Food Engineering*, v. 25, p. 151-166.
- [48] LE MAGUER, M. (1997). Mass transfer modeling in structured foods. *Food engineering* (2000) Chapman & Hall. New York. p. 253-270.

- [49] LENART, A.; FLINK, J.M.; LEWICKI, P.P. (1990). Deshidratación osmótica de manzanas a temperatura alta. Ed: A.S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation, 7-14.
- [50] LERICI, C.R.; PINNAVAIA, G.; DALLA ROSA, M.; BARTOLUCCI, L. (1989). Deshidratación osmótica de la fruta: Influencia de agentes osmóticos en el comportamiento de secado y calidad del producto. *Journal of Food Science*, 56, p. 1393-1398.
- [51] LEWIS, M.J. (1993). Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado. Editorial Acribia. Zaragoza, España. p. 439-174.
- [52] LOBO, M.G. (1995). Caracterización bioquímica de frutos de papaya (carica papaya l.), hembra y hermafrodita, en relación con su aptitud al procesado. Tesis Doctoral. Madrid – España, p. 35-98.
- [53] MONTGOMERY, D. (2002). Diseño y análisis de experimentos. Segunda edición, editorial Limusa Wiley. México. p. 218-275.
- [54] MORENO, J. (1999). Optimización de un procesamiento para la obtención de fresas deshidratadas osmóticamente y estudios de parámetros de calidad en algunos productos obtenidos de ellas. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [55] MORAGA, G., MARTÍNEZ-NAVARRETE, N., CHIRALT, A. (2006). Compositional changes of strawberry due to dehydration, cold storage and freezing– thawing processes. *Journal of Food Processing and Preservation*, 50, p. 458-474.
- [56] MORAGA, M.J., MORAGA, G., FITO, P.J., MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. (2008). Efecto de la impregnación de vacío con el lactato de calcio en la cinética de la deshidratación osmótica y la calidad del pomelo osmodeshidratado. *Journal of Food Engineering*.

- [57] MOY, J.H.; LAU, N.B.H.; DOLLAR, A.M. (1978). Efectos de la sacarosa y de los ácidos en la osmodeshidratación de frutas tropicales. *Journal of food Processing and preservation*. 2(2), p. 131-135.
- [58] NIETO, A.B., SALVATORI, D.M., CASTRO, M.A., ALZAMORA, S.M. (2004). Structural changes in apple during glucose and sucrose osmotic dehydration: Shrinkage, porosity, density and microscopic features. *Journal of Food Engineering*, 61(2): p. 269-278.
- [59] OCHOA, C. Y AYALA, A. (2005). Modelos matemáticos de transferencia de masa en deshidratación osmótica. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*. Mexico. p. 330-342.
- [60] PINO, J. A. (1997). Los constituyentes volátiles de las frutas tropicales. *Alimentaria*, Octubre 97: p. 47-50.
- [61] OCHSE, J.; SOOLE, M. (1980). Cultivos y mejoramientos de plantas tropicales y subtropicales. Ed. Limusa. México.
- [62] PANAGIOTOU, N.M., KARATHANOS, V.T., MAROULLIS, Z.B. (1998). Mass transfer modelling of the osmotic dehydration of some fruits. *Journal of Food Science and Technology*, 33(3): p. 267-284.
- [63] PARJOKO, K.A., RAHMAN, M.S., BUCKLE, K.A., PERERA, C.O. (1996). Osmotic Dehydration kinetics of pineapple wedges using palm sugar. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie* 29, p. 452-459.
- [64] PARK, K.J., BIN, A., BROD, F., PARK, T. (2002). Osmotic dehydration kinetics of pear D'anjou. *Journal of Food Engineering* 52, p. 293-298.
- [65] PEIRÓ, R.; DIAS, V.; CAMACHO, M.M.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. (2006). Flujo de micronutrientes a la solución osmótica durante la deshidratación osmótica de pomelo. *Journal of Food Engineering*, 74, p. 299-307.
- [66] PERFETTI, J. (2000). Papaya producción mundial. Corporación Colombia Internacional. Manual del exportador de frutas, hortalizas y tubérculos en Colombia.

- [67] PESTANO, B. (2001). El cultivo de la papaya. GaciCuba, grupo de apoyo a las cooperativas independientes de Cuba. Florida, U.S.A.
- [68] PINO, J.A., CASTRO, D., FITO, P., BARAT, J.M., LÓPEZ, F. (1999). Análisis estadístico multivariante de los compuestos volátiles como criterio de selección de parámetros tecnológicos en la deshidratación osmótica de piña. *Journal of Food Quality*, 22(6): p. 653-662.
- [69] POINTING, J.D. (1973). Deshidratación osmótica de frutas. Modificación y usos recientes. *Process Biochemistry*, 8(12), p. 18-20.
- [70] PONTING, J.D., WATTERS, G.G., FORREY, R.R., JACKSON, R., STANLEY, W.L. (1966). Deshidratación osmótica de frutas. *Food Technology*, 20(10): p. 125-128.
- [71] RAOULT-WACK, A., BOTZ, O., GUILBERT, S. Y RÍOS G. (1991). Simultaneous water and solute transportation in shrinking media- Part 1. Simultaneous dewatering and impregnation soaking process analysis (osmotic dehydration) *Drying Technol.* 9 (3): p. 589-612.
- [72] RASTOGI, N.K.; RAGHAVARAO, K.S. (2004). Mass Transfer during Osmotic Dehydration of Pineapple: considering Fickian Diffusion in Cubical Configuration. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, v. 37, p. 43-47.
- [73] RASTOGI, N.K.; RANGHAVARAO, K.S. (1994). Effect of temperature and concentration on osmotic dehydration of coconut. *Lebensmittel und Technologie*, 27, p. 564-567.
- [74] REYES, C. P. (1997). *Diseño de experimentos aplicados*. Editorial Trillas, México. p. 48-81.
- [75] SALVATORI, D., ANDRÉS, A., CHIRALT, A., FITO, P. (1999). Osmotic dehydration progression in apple tissue I: spatial distribution of solutes and moisture content. *Journal of Food Engineering* 42, p. 125-132.

- [76] SÁNCHEZ, D. (1985). Evaluación de los Factores que Afectan la Velocidad de Confitado. Tesis UNALM. p. 14-110.
- [77] SANJINEZ-ARGANDOÑA, E.J. (1999). Desidratação Osmótica de Goiaba por Imersão e Secagem. Campinas, 102p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- [78] SAPUTRA, D. (2001). Deshidratación osmótica de piña. *Drying Technology* 19(2), p. 415-425.
- [79] SHAFIUR, R. (2003). Manual de conservación de los alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza, p. 189-211.
- [80] SHARMA, S.; MULVANEY, S.; RIZVI, S. (2003). Ingeniería de alimentos operaciones unitarias y prácticas de laboratorio. Editorial Limusa Wiley. Mexico, p. 225-235.
- [81] SHEWFELT, R.L. (1987). Calidad de las frutas y vegetales mínimamente procesadas. *Journal of Food Quality*, 10(3), p. 143-156.
- [82] TELIS, V.R.; MURARI, R.C.; YAMASHITA, F. (2003). Diffusion Coefficients During Osmotic Dehydration of Tomatoes in Ternary Solutions. *Journal of Food Engineering*, v. 61, n. 2, p. 253-259.
- [83] TIJERO, F. (1992). Manual el cultivo del Papayo en el Perú, Proyecto TTA Actividad Difusión de Tecnología. Editorial Fundeagro, Primer Edición. p. 18-45.
- [84] TORREGGIANI, D. (1993). Deshidratación osmótica en el procesamiento de frutas y vegetales. *Food Res. Int.* 26, p. 27-44.
- [85] TORRES, J. (2007). Optimización de las condiciones de operación de tratamientos osmóticos destinados al procesado mínimo de mango (*Mangifera indica* L.). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España.

- [86] TREYBAL, R. (1998). Operaciones de transferencia de masa. Editorial McGraw-Hill. México. p. 23-46.
- [87] VIAL, C.; GULIBERT, S.; CUQ, J.L. (1991). Deshidratación osmótica de kiwis: Influencia de las variables de proceso en el color y el contenido de ácido ascórbico. *Sciences des Aliments*. 11, p. 63-64.
- [88] WILEY, R.C. (1997a). Introducción a las frutas y hortalizas mínimamente procesadas, en: *Frutas y hortalizas mínimamente procesadas y refrigeradas*. Editorial Acribia. Zaragoza, p. 65-130.
- [89] WILEY, R.C. (1997b). Métodos de conservación de las frutas y hortalizas mínimamente procesadas y refrigeradas, en: *Frutas y hortalizas mínimamente procesadas y refrigeradas*. Editorial Acribia. Zaragoza, España. p. 65-130.
- [90] YAO, Z., LE MAGUER, M. (1997). Mathematical modelling and simulation of mass transfer in osmotic dehydration processes. *Journal of Food Engineering* 32, p. 21-32.

Anexos

Apéndice A

Análisis químico proximal

A.1. Determinación del contenido de humedad (Método A.O.A.C. 1998)

Materiales y equipos:

- Placas petri.
- Balanza analítica
- Desecador con Silicagel
- Estufa eléctrica

Procedimiento:

Se pesa 5 gr de muestra triturada en la placa petri limpia y seca, bien tarado. Se coloca la muestra en la estufa a 105°C durante seis horas. Se retira de la estufa y se deja enfriar en la campana de desecación con silicagel, luego se procede a pesar las placas, un peso constante indicará que la muestra ha perdido toda presencia de agua.

Cálculo:

$$\% \text{ Humedad} = \left[\frac{(\text{Peso placa con muestra} - \text{Peso placa vacía})}{\text{Peso de muestra}} \right] 100 \quad (\text{A.1})$$

A.2. Determinación de cenizas (Método A.O.A.C. 1998)

Materiales y equipos:

- Crisol de porcelana
- Pinzas metálica
- Desecador con Silicagel
- Horno de calcinación (mufla)

Procedimiento:

Colocar los crisoles limpios en la mufla a 600°C durante una hora. Enfriar los crisoles en desecador a temperatura del laboratorio, luego pesar evitando que absorba humedad. Pesar 2 gr de muestra en crisol tarado, colocarlo en la mufla a 600°C aproximadamente 3 horas, en seguida enfriar el crisol en desecador, cuando esté frío, pesar el crisol rápidamente y registrar el peso.

Cálculo:

$$\% \text{ Cenizas} = \left[\frac{(\text{Peso crisol con ceniza} - \text{Peso crisol vacía})}{\text{Peso de muestra}} \right] 100 \quad (\text{A.2})$$

A.3. Determinación de proteína (Kjeldahl) (Método A.O.A.C. 1984)

Materiales, reactivos y equipos:

- Ácido sulfúrico concentrado
- Catalizador de oxidación (mezcla de sulfato de cobre y sulfato de potasio)
- Ácido bórico – indicador de pH (rojo de metilo y verde bromocresol)
- Ácido clorhídrico, 0,5N
- Hidróxido de sodio
- Matraz de erlenmeyer
- Balones de digestión
- Cocina de digestión
- Sistema de destilación de Kjeldahl

Procedimiento:

Pesar 0,3 gr de muestra, luego agregar 1 gr de catalizador de oxidación para acelerar la reacción, limpiar con un poco de agua el cuello del balón de digestión, agregar 2,5 ml de ácido sulfúrico concentrado y colocar el balón en la cocina de digestión. La digestión termina cuando el contenido del balón se encuentra completamente cristalino.

Colocar la muestra digerida en el aparato de destilación, agregar 5 ml de NaOH concentrado e inmediatamente conectar el vapor para que se produzca la destilación. Conectar el refrigerante y recibir el destilado en un erlenmeyer conteniendo 5 ml de la muestra de ácido bórico más indicador de pH. La destilación termina cuando ya no pasa más amoníaco y hay viraje del indicador. Luego se procede a la titulación con HCl valorado (aproximadamente 0,05N), tomar nota del gasto.

Cálculo:

Cantidad de nitrógeno.

$$\% \text{ Nitrogeno} = \left[\frac{V_{HCl} N_{HCl} meq_N}{\text{Peso de muestra}} \right] 100 \quad (\text{A.3})$$

Para obtener la cantidad de proteína bruta se utiliza la siguiente relación:

$$\% \text{ Proteina} = 6,25 \% \text{ Nitrogeno} \quad (\text{A.4})$$

A.4. Determinación de extracto etéreo (Soxhlet) (Método A.O.A.C. 1998)

Materiales, reactivos y equipos:

- Balones Soxhelt
- Papel filtro Watman N° 2
- Balanza analítica
- Solvente orgánico (Hexano)
- Equipo de extractor Soxhelt

Procedimiento:

Para este método se utilizan muestras deshidratadas y molidas. El balón de Soxhelt lavar y poner a secar en la estufa a 110°C por espacio de una hora, sacarlo, enfriar en un desecador y pesar.

Pesar 5 gr de muestra, empaquetarlo en un pedazo de papel filtro Whatman N° 2, hacer un cartucho. Colocar el cartucho en el cuerpo del aparato Soxhlet y agregar el solvente orgánico a utilizar hasta que una parte del mismo sifonee hacia el balón previamente pesado.

Seguidamente, conectar a la estufa eléctrica a temperatura baja, controlar la velocidad de goteo de 30 a 40 gotas por minuto. El proceso dura aproximadamente tres horas.

El balón se debe sacarse del aparato cuando contiene poco hexano, es decir momento antes de que este sea sifoneado desde el cuerpo.

Evaporar el solvente remanente en el balón en una estufa y enfriar en el desecador. Pesar y anotar.

Cálculo:

$$\% \text{ Extracto etéreo} = \left[\frac{(\text{Peso balón con grasa} - \text{Peso balón vacío})}{\text{Peso de muestra}} \right] 100 \quad (\text{A.5})$$

A.5. Determinación de fibra cruda (Método A.O.A.C. 1984)

Materiales, reactivos y equipos:

- Ácido sulfúrico 1,25 %
- Hidróxido de sodio 1,25 %
- Vasos de 600 ml
- Papel filtro Whatman N°2
- Estufa eléctrica
- Embudo de Buchner
- Matraz kitasato
- Bomba de vacío.

Procedimiento:

Digestión ácida: Pesar 3 g de muestra (exenta de grasa) en un vaso de 600 ml añadir 200 ml de H_2SO_4 al 1,25. Hervir suavemente 30 min de hervido, filtrar el contenido del balón haciendo uso del embudo Buchner y el kitasato. lavar con agua caliente para neutralizar la acidez.

Digestión alcalina: Añadir 200 ml de NaOH al 1,25 %, hervir exactamente 30 minutos, con el mismo cuidado que en la ebullición con ácido. Filtrar el contenido del erlenmeyer, lavando con agua destilada hirviendo, lavar con agua caliente tres veces. Luego desecar a $100^\circ C$ en estufa por 2 horas. Pesar el crisol vacío, colocar la muestra en un crisol y pesar (P_1). Secar a $600^\circ C$ durante 3 horas. Enfriar el crisol en desecador y volver a pesar crisol más muestra (P_2).

Cálculo:

$$\% \text{ Fibra bruta} = \left[\frac{(P_2 - P_1)}{\text{Peso de muestra}} \right] 100 \quad (\text{A.6})$$

A.6. Determinación de carbohidratos

Los carbohidratos se determinaron por diferencias después de que se haya completado los análisis para, humedad, cenizas, fibra cruda, extracto etéreo y proteína cruda.

Cálculo:

$$\% \text{Carbohidratos} = [100 - (\% \text{humedad} + \% \text{ceniza} + \% \text{fibra} + \% \text{grasa} + \% \text{proteína})] \quad (\text{A.7})$$

A.7. Determinación de sólidos solubles

El contenido de sólidos solubles se determina con el índice de refracción. Este método se emplea mucho en la elaboración de frutas y hortalizas, para determinar la concentración de sacarosa de estos productos. Los azúcares en disolución (a menudo referidos como sólidos solubles) se expresan en equivalente de sacarosa.

La concentración en sólidos solubles de los zumos se expresa en grados brix. Originariamente, los grados brix son una medida de densidad. Un grado Brix es la densidad que tiene, a 20° C, una solución de sacarosa al 1 %, y a esta concentración corresponde también un determinado índice de refracción. Por comodidad, se utilizó mucho el refractómetro portátil que normalmente tiene una escala en grados Brix.

Procedimiento:

- Poner una o dos gotas de la muestra sobre el prisma del refractómetro.
- Cubrir el prisma con la tapa con cuidado.
- Al cerrar, la muestra debe distribuirse sobre la superficie del prisma.
- Orientando el aparato hacia una fuente de luz, mirar con el ojo a través del campo visual.
- En el campo visual, se verá una transición de un campo claro a uno oscuro. Leer el número correspondiente en la escalera. Este corresponde al % en sacarosa de la muestra.
- Luego abrir la tapa y limpiar la muestra del prisma con un pedazo de papel o algodón limpio y mojado.

Apéndice B

Respuestas de %PA, %GS y %PP para cada tratamiento a diferentes tiempos de proceso

En las tablas B.1, B.2 y B.3 se muestra los datos experimentales de porcentaje de pérdida de agua (%PA), porcentaje de ganancia de sólidos (%GS) y porcentaje de pérdida de masa (%PP) del alimento obtenidos para los ocho tratamientos a diferentes tiempos (t) de proceso.

Tabla B.1: Porcentaje de pérdida de agua(%PA) para los ocho tratamientos a diferentes tiempos de proceso.

PÉRDIDA DE AGUA (% PA)								
t (h)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
0.5	9.515	15.332	16.976	13.937	12.440	17.672	17.716	20.962
1	11.676	21.828	20.166	17.693	15.960	22.700	23.035	26.104
1.5	14.727	25.184	22.204	21.621	18.876	30.058	27.326	29.397
2	16.901	28.786	27.421	25.889	18.627	27.365	30.074	33.013
3	18.312	35.193	32.029	29.395	24.011	36.058	33.095	37.901
4	22.685	38.870	35.117	35.170	23.575	40.377	38.281	42.694
5	23.728	40.933	37.304	37.362	26.120	44.762	39.259	46.093
6	26.363	44.049	39.290	41.951	28.998	51.746	43.399	50.778

Tabla B.2: Porcentaje de ganancia de sólidos (%GS) para los ocho tratamientos a diferentes tiempos de proceso.

GANANCIA DE SÓLIDOS (% GS)								
t (h)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
0.5	4.581	2.154	3.964	5.809	2.534	0.934	2.595	2.749
1	4.999	2.781	4.017	7.019	3.003	1.710	2.934	4.962
1.5	5.833	3.546	5.028	8.489	4.505	2.119	3.026	6.470
2	6.996	4.806	4.685	9.171	5.158	2.614	3.843	6.925
3	8.317	4.937	5.959	9.824	5.998	3.325	4.598	6.822
4	9.037	5.799	7.222	10.816	6.811	3.966	5.383	7.110
5	10.809	6.837	6.827	11.021	7.300	4.457	7.042	8.602
6	11.079	8.211	8.091	12.217	8.910	5.449	6.474	8.607

Tabla B.3: Porcentaje de pérdida de masa (%PP) para los ocho tratamientos a diferentes tiempos de proceso.

PÉRDIDA DE MASA (% PP)								
t (h)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
0.5	4.935	13.178	13.012	8.128	9.905	16.737	15.121	18.213
1	6.677	19.046	16.150	10.673	12.957	20.990	20.100	21.142
1.5	8.894	21.637	17.176	13.132	14.371	27.939	24.300	22.926
2	9.905	23.980	22.736	16.718	13.469	24.751	26.231	26.089
3	9.995	30.256	26.069	19.571	18.014	32.733	28.496	31.080
4	13.648	33.071	27.895	24.354	16.765	36.411	32.897	35.584
5	12.919	34.096	30.477	26.341	18.820	40.306	32.217	37.491
6	15.284	35.839	31.199	29.734	20.087	46.298	36.925	42.171

Apéndice C

Datos experimentales para el análisis estadístico de %PA, %GS y %PP a 6 horas de proceso

En las tablas C.1, C.2 y C.3 se muestra los datos experimentales para el análisis estadístico del porcentaje de pérdida de agua (%PA), porcentaje de ganancia de sólidos (%GS) y porcentaje de pérdida de masa (%PP) obtenidos por triplicado para los ocho tratamientos a 6 horas de proceso.

Tabla C.1: Datos experimentales para el análisis estadístico del porcentaje de pérdida de agua (%PA).

Ensayo	PLAN DE EXPERIMENTACIÓN			RESPUESTA (%PA)		
	Conc. (°Brix)	Temp. (°C)	Soluto	R ₁	R ₂	R ₃
<i>T</i> ₁	40	30	Glucosa	26.363	27.960	24.765
<i>T</i> ₂	60	30	Glucosa	44.288	45.716	42.145
<i>T</i> ₃	40	40	Glucosa	39.657	37.454	40.759
<i>T</i> ₄	60	40	Glucosa	42.343	39.991	43.520
<i>T</i> ₅	40	30	Sacarosa	29.269	27.643	30.082
<i>T</i> ₆	60	30	Sacarosa	55.022	47.161	53.056
<i>T</i> ₇	40	40	Sacarosa	43.634	45.041	41.523
<i>T</i> ₈	60	40	Sacarosa	50.428	48.327	53.579

Tabla C.2: Datos experimentales para el análisis estadístico del porcentaje de ganancia de sólidos (%GS).

Ensayo	PLAN DE EXPERIMENTACIÓN			RESPUESTA (%GS)		
	Conc. (°Brix)	Temp. (°C)	Soluto	R ₁	R ₂	R ₃
<i>T</i> ₁	40	30	Glucosa	10.407	11.750	11.079
<i>T</i> ₂	60	30	Glucosa	7.856	8.522	8.255
<i>T</i> ₃	40	40	Glucosa	8.394	7.713	8.167
<i>T</i> ₄	60	40	Glucosa	12.674	11.646	12.331
<i>T</i> ₅	40	30	Sacarosa	9.243	8.494	8.993
<i>T</i> ₆	60	30	Sacarosa	5.587	4.966	5.794
<i>T</i> ₇	40	40	Sacarosa	6.194	6.719	6.509
<i>T</i> ₈	60	40	Sacarosa	9.082	8.192	8.548

Tabla C.3: Datos experimentales para el análisis estadístico del porcentaje de pérdida de masa (%PP).

Ensayo	PLAN DE EXPERIMENTACIÓN			RESPUESTA (%PP)		
	Conc. (°Brix)	Temp. (°C)	Soluto	R ₁	R ₂	R ₃
<i>T</i> ₁	40	30	Glucosa	15.955	16.210	13.686
<i>T</i> ₂	60	30	Glucosa	36.432	37.195	33.889
<i>T</i> ₃	40	40	Glucosa	31.264	29.741	32.592
<i>T</i> ₄	60	40	Glucosa	29.669	28.345	31.188
<i>T</i> ₅	40	30	Sacarosa	20.025	19.149	21.088
<i>T</i> ₆	60	30	Sacarosa	49.435	42.195	47.263
<i>T</i> ₇	40	40	Sacarosa	37.440	38.323	35.014
<i>T</i> ₈	60	40	Sacarosa	41.346	40.135	45.032

Apéndice D

Cálculo de las difusividades efectivas

$$D_e^j$$

Las difusividades efectivas D_e^j del agua y de los solutos fueron calculados a través del modelo de Azuara *et al.* (1992) usando los parámetros obtenidos antes detallados.

$$\Delta M_t^j = \frac{S_j t (\Delta M_\infty^j)}{1 + S_j t} \quad (\text{D.1})$$

Donde:

ΔM_t^j : Fracción de agua perdida o de sólidos solubles ganados por el alimento en el tiempo t

ΔM_∞^j : Fracción de agua perdida o de sólidos solubles ganados por el alimento en el equilibrio

S_j : parámetro definido como constante de velocidad relativa a la pérdida de agua o a la ganancia de sólidos (Parjoko *et al.*, 1996)

Para predecir ΔM_t^j (Fracción de agua perdida o de sólidos solubles ganados por el alimento) en el momento (t) en la ecuación (D.1), es necesario conocer el valor de S_j y ΔM_∞^j . Estas constantes pueden ser calculadas a través de una regresión lineal, usando datos experimentales obtenidos durante un periodo de tiempo (t). La forma lineal de la ecuación (D.1) se plasma de la siguiente manera:

$$\frac{t}{\Delta M_t^j} = \left(\frac{1}{\Delta M_\infty^j} \right) t + \left(\frac{1}{S_j \Delta M_\infty^j} \right) \quad (D.2)$$

La ecuación (D.2) toma la forma de una ecuación lineal $y = mx + b$, el cual considerando la ecuación se tiene $y = \frac{t}{\Delta M_t^j}$, $x = t$, $m = \frac{1}{\Delta M_\infty^j}$ y $b = \frac{1}{S_j \Delta M_\infty^j}$, donde $\frac{1}{\Delta M_\infty^j}$ se pueden calcular a partir de la pendiente de $\frac{t}{\Delta M_t^j}$ contra t .

Relacionando la ecuación (D.2) con el modelo propuesto por Crank (1975) el cual basándose en la segunda *ley de Fick* propuso una ecuación para la difusión:

$$\frac{\Delta M_t^j}{\Delta M_\infty^j} = 2 \left\{ \frac{D_e^j t}{l^2 \pi} \right\}^{0,5} \quad (D.3)$$

Obteniéndose una ecuación capaz de calcular la difusividad efectiva en los diferentes tiempos para una geometría cúbica, es decir, considerando las dimensiones características como la arista de un cubo:

$$D_e^w = \frac{\pi}{4t^{\frac{1}{3}}} \left[\left(\frac{S_w l^3}{1 + S_w t} \right) \left(\frac{\Delta M_\infty^{w,mod}}{\Delta M_\infty^{w,exp}} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (D.4)$$

Análogamente, la difusividad de los solutos puede ser obtenida por la ecuación (4.5):

$$D_e^s = \frac{\pi}{4t^{\frac{1}{3}}} \left[\left(\frac{S_s l^3}{1 + S_s t} \right) \left(\frac{\Delta M_\infty^{s,mod}}{\Delta M_\infty^{s,exp}} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (D.5)$$

Donde:

D_e^w : Difusividad efectiva para el agua en el tiempo t , $\frac{m^2}{s}$

$\Delta M_\infty^{w,mod}$: Fracción de agua perdida por el alimento en el equilibrio obtenido a través de una regresión lineal, ecuación (D.2).

$\Delta M_\infty^{w,exp}$: Fracción de agua perdida por el alimento en el equilibrio obtenido experimentalmente.

l : Dimensión característica (la mitad del espesor del cubo), m

t : Tiempo, s

D_e^s : Difusividad efectiva para los sólidos solubles en el tiempo t , $\frac{m^2}{s}$

$\Delta M_\infty^{s,mod}$: Fracción de sólidos solubles ganados por el alimento en el equilibrio obtenido a través de una regresión lineal, ecuación (D.2).

$\Delta M_\infty^{s,exp}$: Fracción de sólidos solubles ganados por el alimento en el equilibrio obtenido experimentalmente.

La difusividad efectiva media $\overline{D_e^j}$ fue calculado haciéndose una media aritmética de los valores de difusividad encontrados para cada tiempo:

$$\overline{D_e^j} = \frac{\sum_{n=1}^n (D_e^j)}{n} \quad (D.6)$$

Donde:

D_e^j : Difusividad efectiva para un componente del alimento en el tiempo t , $\frac{m^2}{s}$

n : Número de datos utilizados

$\overline{D_e^j}$: Difusividad efectiva media para un componente del alimento, $\frac{m^2}{s}$

D.1. Tratamiento 01 (T_1)

En la tabla D.1 se muestra los datos experimentales de fracción de agua perdido (ΔM_t^w) por el alimento, fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) por el alimento obtenidos para los diferentes tiempos (t) y las relaciones $t/\Delta M_t^w$ y $t/\Delta M_t^s$ obtenidos para el cálculo de ΔM_∞^w , ΔM_∞^s , S_w y S_s a través de una regresión lineal (figuras D.1 y D.2).

Tabla D.1: Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).

TRATAMIENTO 01 (T ₁)				
$t(s)$	ΔM_t^w	ΔM_t^s	$t/\Delta M_t^w$	$t/\Delta M_t^s$
1800	0.095	0.046	18917.032	39296.925
3600	0.117	0.050	30831.488	72008.169
5400	0.147	0.058	36668.530	92581.949
7200	0.169	0.070	42601.321	102913.164
10800	0.183	0.083	58977.545	129860.818
14400	0.227	0.090	63478.535	159340.092
18000	0.237	0.108	75859.533	166533.414
21600	0.264	0.111	81934.364	194969.333

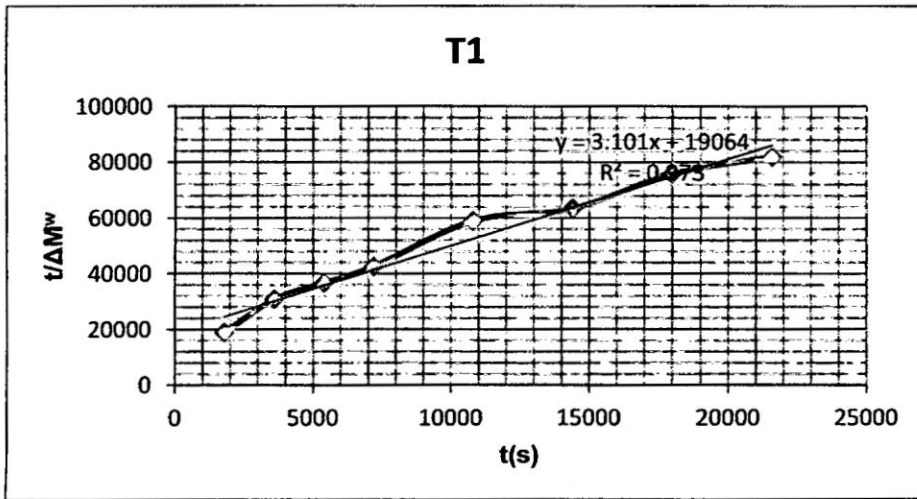


Figura D.1: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t

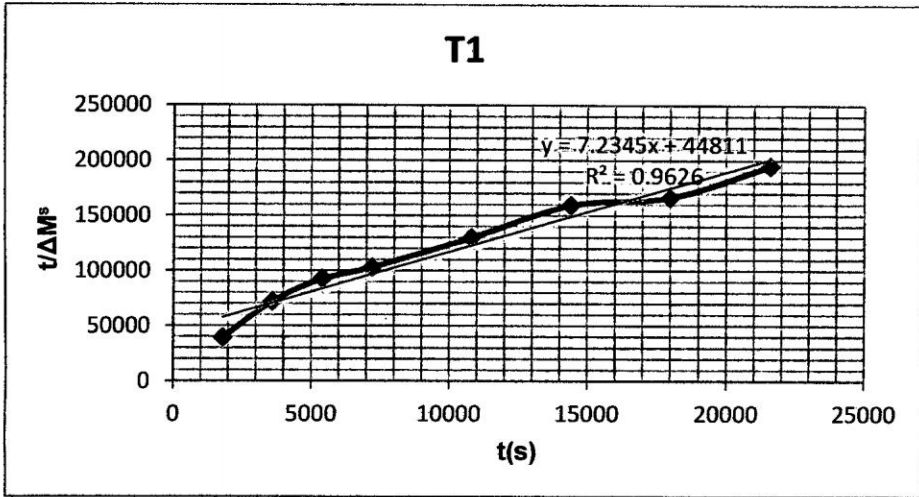


Figura D.2: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t

Los valores de S_w , S_s , ΔM_∞^w y ΔM_∞^s se obtienen a partir de la linealización de la ecuación (D.1) relacionándolos con la constante b y la pendiente m (obtenidos gráficamente, figuras D.1 y D.2) en la ecuación (D.2).

Tabla D.2: Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s

m	$= 3.10100$	m	$= 7.23450$
b	$= 19064.00$	b	$= 44811.00$
R^2	$= 0.97300$	R^2	$= 0.96260$
ΔM_∞^w	$= 0.32248$	ΔM_∞^s	$= 0.13823$
s	$= 0.00016$	s	$= 0.00016$
l	$= 0.01000$	l	$= 0.01000$
π	$= 3.14159$	π	$= 3.14159$
t	$= 21600.00$	t	$= 21600.00$

Con los valores obtenidos (tabla D.2) se procede a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para un tiempo de proceso de 6 horas ($t = 21600$ segundos) y dimensión característica del modelo (la mitad del espesor del cubo, $l = 0,01$ metros); los valores de m , b , R^2 , ΔM_∞^j , s y π son adimensionales. Reemplazando en las ecuaciones (D.4) y (D.5) respectivamente se obtienen: $D_e^w = 3,5193E - 09 \frac{m^2}{s}$ y $D_e^s = 3,5621E - 09 \frac{m^2}{s}$.

De la misma manera con los mismos valores obtenidos en la tabla D.2 se procede

a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso, las cuales se muestra en la tabla D.3:

Tabla D.3: Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso

$t(s)$	D_e^w	$t(s)$	D_e^s
1800	$\Rightarrow 3.6578E-08$	1800	$\Rightarrow 3.3724E-08$
3600	$\Rightarrow 2.2106E-08$	3600	$\Rightarrow 2.2053E-08$
5400	$\Rightarrow 1.4776E-08$	5400	$\Rightarrow 1.5534E-08$
7200	$\Rightarrow 1.1120E-08$	7200	$\Rightarrow 1.1355E-08$
10800	$\Rightarrow 7.8532E-09$	10800	$\Rightarrow 7.5425E-09$
14400	$\Rightarrow 5.4405E-09$	14400	$\Rightarrow 5.7040E-09$
18000	$\Rightarrow 4.4012E-09$	18000	$\Rightarrow 4.2209E-09$
21600	$\Rightarrow 3.5193E-09$	21600	$\Rightarrow 3.5621E-09$

Las difusividades efectivas medias $\overline{D_e^w}$ y $\overline{D_e^s}$ fueron calculados haciéndose una media aritmética de los valores de difusividad encontrados para cada tiempo y reemplazando en la ecuación (D.6), obteniéndose: $\overline{D_e^w} = 1,3224E - 08 \frac{m^2}{s}$ y $\overline{D_e^s} = 1,2962E - 08 \frac{m^2}{s}$.

D.2. Tratamiento 02 (T_2)

En la tabla D.4 se muestra los datos experimentales de fracción de agua perdido (ΔM_t^w) por el alimento, fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) por el alimento obtenidos para los diferentes tiempos (t) y las relaciones $t/\Delta M_t^w$ y $t/\Delta M_t^s$ obtenidos para el cálculo de ΔM_∞^w , ΔM_∞^s , S_w y S_s a través de una regresión lineal (figuras D.3 y D.4).

Tabla D.4: Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).

TRATAMIENTO 02 (T ₂)				
$t(s)$	ΔM_t^w	ΔM_t^s	$t/\Delta M_t^w$	$t/\Delta M_t^s$
1800	0.153	0.022	11739.854	83551.485
3600	0.218	0.028	16492.770	129435.636
5400	0.252	0.035	21442.404	152271.193
7200	0.288	0.048	25011.780	149802.034
10800	0.352	0.049	30687.882	218744.294
14400	0.389	0.058	37046.713	248305.145
18000	0.409	0.068	43974.452	263287.484
21600	0.440	0.082	49035.805	263064.917

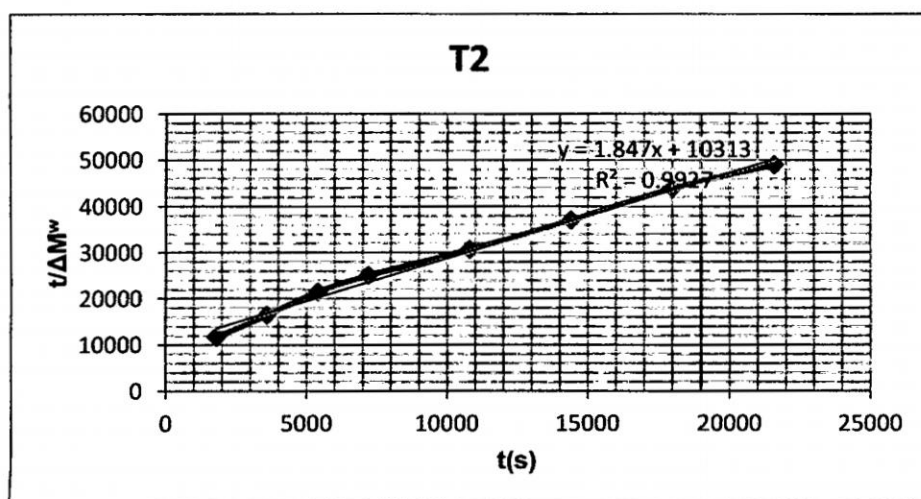


Figura D.3: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t

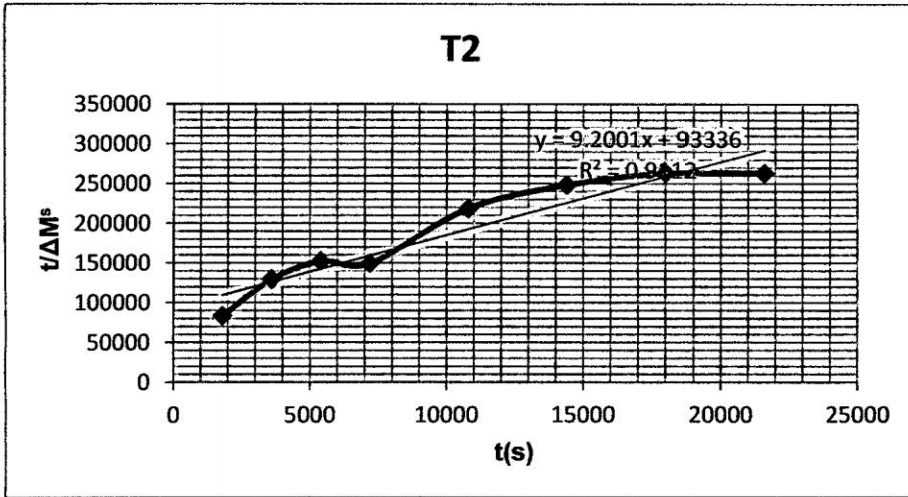


Figura D.4: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t

Los valores de S_w , S_s , ΔM_∞^w y ΔM_∞^s se obtienen a partir de la linealización de la ecuación (D.1) relacionándolos con la constante b y la pendiente m (obtenidos gráficamente, figuras D.3 y D.4) en la ecuación (D.2).

Tabla D.5: Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s

m	$= 1.84700$	m	$= 9.20010$
b	$= 10313.00$	b	$= 93336.00$
R^2	$= 0.99270$	R^2	$= 0.91120$
ΔM_∞^w	$= 0.54142$	ΔM_∞^s	$= 0.10869$
s	$= 0.00018$	s	$= 0.00010$
l	$= 0.01000$	l	$= 0.01000$
π	$= 3.14159$	π	$= 3.14159$
t	$= 21600.00$	t	$= 21600.00$

Con los valores obtenidos (tabla D.5) se procede a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para un tiempo de proceso de 6 horas ($t = 21600$ segundos) y dimensión característica del modelo (la mitad del espesor del cubo, $l = 0,01$ metros); los valores de m , b , R^2 , ΔM_∞^j , s y π son adimensionales. Reemplazando en las ecuaciones (D.4) y (D.5) respectivamente se obtienen: $D_e^w = 3,5793E - 09 \frac{m^2}{s}$ y $D_e^s = 3,3913E - 09 \frac{m^2}{s}$.

De la misma manera con los mismos valores obtenidos en la tabla D.5 se procede

a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso, las cuales se muestra en la tabla D.6:

Tabla D.6: Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso

$t(s)$	D_e^w	$t(s)$	D_e^s
1800	$\Rightarrow 3.9485E-08$	1800	$\Rightarrow 3.6347E-08$
3600	$\Rightarrow 2.1412E-08$	3600	$\Rightarrow 2.2158E-08$
5400	$\Rightarrow 1.5092E-08$	5400	$\Rightarrow 1.5165E-08$
7200	$\Rightarrow 1.1335E-08$	7200	$\Rightarrow 1.0458E-08$
10800	$\Rightarrow 7.3405E-09$	10800	$\Rightarrow 7.9136E-09$
14400	$\Rightarrow 5.4676E-09$	14400	$\Rightarrow 5.8105E-09$
18000	$\Rightarrow 4.3910E-09$	18000	$\Rightarrow 4.4121E-09$
21600	$\Rightarrow 3.5793E-09$	21600	$\Rightarrow 3.3913E-09$

Las difusividades efectivas medias $\overline{D_e^w}$ y $\overline{D_e^s}$ fueron calculados haciéndose una media aritmética de los valores de difusividad encontrados para cada tiempo y reemplazando en la ecuación (D.6), obteniéndose: $\overline{D_e^w} = 1,3513E - 08 \frac{m^2}{s}$ y $\overline{D_e^s} = 1,3207E - 08 \frac{m^2}{s}$.

D.3. Tratamiento 03 (T_3)

En la tabla D.7 se muestra los datos experimentales de fracción de agua perdido (ΔM_t^w) por el alimento, fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) por el alimento obtenidos para los diferentes tiempos (t) y las relaciones $t/\Delta M_t^w$ y $t/\Delta M_t^s$ obtenidos para el cálculo de ΔM_∞^w , ΔM_∞^s , S_w y S_s a través de una regresión lineal (figuras D.5 y D.6).

Tabla D.7: Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).

TRATAMIENTO 03 (T ₃)				
$t(s)$	ΔM_t^w	ΔM_t^s	$t / \Delta M_t^w$	$t / \Delta M_t^s$
1800	0.170	0.040	10603.049	45407.630
3600	0.202	0.040	17851.431	89628.946
5400	0.222	0.050	24319.619	107397.431
7200	0.274	0.047	26257.351	153680.446
10800	0.320	0.060	33719.647	181223.868
14400	0.351	0.072	41006.246	199389.002
18000	0.373	0.068	48251.657	263656.997
21600	0.393	0.081	54975.545	266958.066

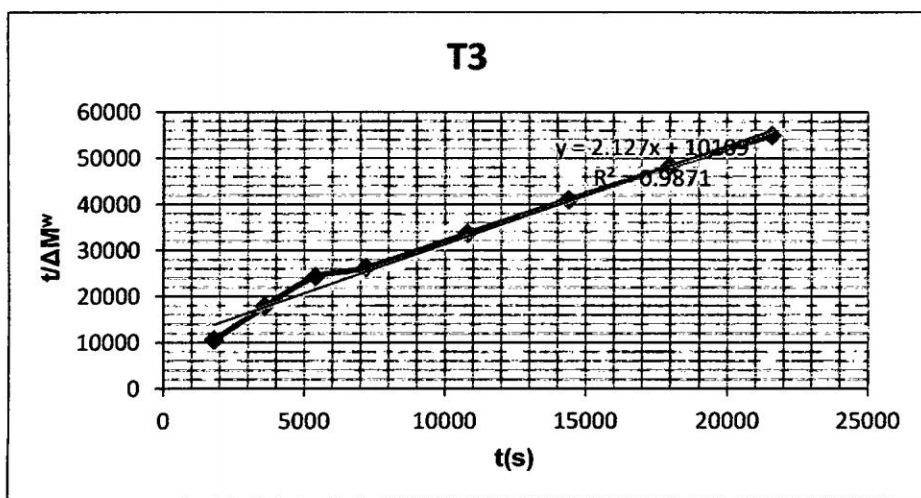


Figura D.5: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t

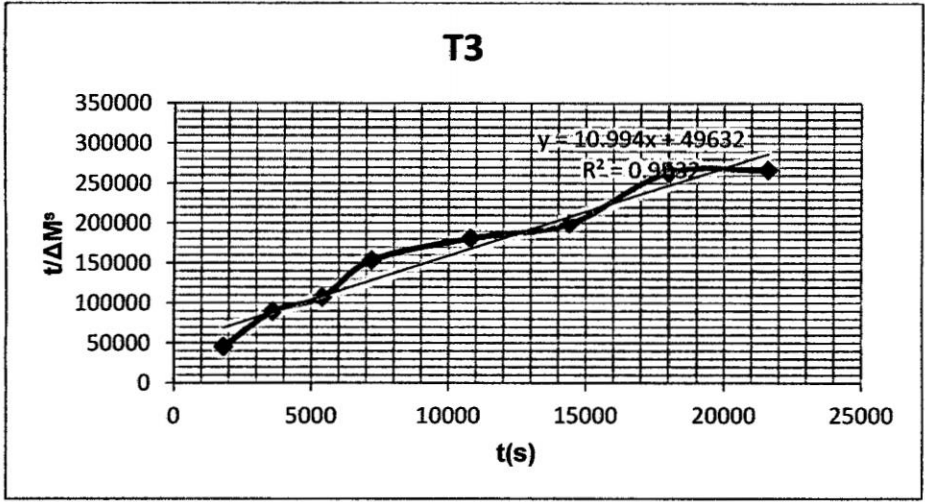


Figura D.6: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t

Los valores de S_w , S_s , ΔM_∞^w y ΔM_∞^s se obtienen a partir de la linealización de la ecuación (D.1) relacionándolos con la constante b y la pendiente m (obtenidos gráficamente, figuras D.5 y D.6) en la ecuación (D.2).

Tabla D.8: Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s

m	$= 2.12700$	m	$= 10.99400$
b	$= 10109.00$	b	$= 49632.00$
R^2	$= 0.98710$	R^2	$= 0.95320$
ΔM_∞^w	$= 0.47015$	ΔM_∞^s	$= 0.09096$
s	$= 0.00021$	s	$= 0.00022$
l	$= 0.01000$	l	$= 0.01000$
π	$= 3.14159$	π	$= 3.14159$
t	$= 21600.00$	t	$= 21600.00$

Con los valores obtenidos (tabla D.8) se procede a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para un tiempo de proceso de 6 horas ($t = 21600$ segundos) y dimensión característica del modelo (la mitad del espesor del cubo, $l = 0,01$ metros); los valores de m , b , R^2 , ΔM_∞^j , s y π son adimensionales. Reemplazando en las ecuaciones (D.4) y (D.5) respectivamente se obtienen: $D_e^w = 3,5894E - 09 \frac{m^2}{s}$ y $D_e^s = 3,4640E - 09 \frac{m^2}{s}$.

De la misma manera con los mismos valores obtenidos en la tabla D.8 se procede

a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso, las cuales se muestra en la tabla D.9:

Tabla D.9: Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso

$t(s)$	D_e^w	$t(s)$	D_e^s
1800	$\Rightarrow 3.6362E-08$	1800	$\Rightarrow 3.2878E-08$
3600	$\Rightarrow 2.1886E-08$	3600	$\Rightarrow 2.1885E-08$
5400	$\Rightarrow 1.5743E-08$	5400	$\Rightarrow 1.4402E-08$
7200	$\Rightarrow 1.1146E-08$	7200	$\Rightarrow 1.2272E-08$
10800	$\Rightarrow 7.3656E-09$	10800	$\Rightarrow 7.6379E-09$
14400	$\Rightarrow 5.4781E-09$	14400	$\Rightarrow 5.3035E-09$
18000	$\Rightarrow 4.3547E-09$	18000	$\Rightarrow 4.5509E-09$
21600	$\Rightarrow 3.5894E-09$	21600	$\Rightarrow 3.4640E-09$

Las difusividades efectivas medias $\overline{D_e^w}$ y $\overline{D_e^s}$ fueron calculados haciéndose una media aritmética de los valores de difusividad encontrados para cada tiempo y reemplazando en la ecuación (D.6), obteniéndose: $\overline{D_e^w} = 1,3241E - 08 \frac{m^2}{s}$ y $\overline{D_e^s} = 1,2799E - 08 \frac{m^2}{s}$.

D.4. Tratamiento 04 (T_4)

En la tabla D.10 se muestra los datos experimentales de fracción de agua perdido (ΔM_t^w) por el alimento, fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) por el alimento obtenidos para los diferentes tiempos (t) y las relaciones $t/\Delta M_t^w$ y $t/\Delta M_t^s$ obtenidos para el cálculo de ΔM_∞^w , ΔM_∞^s , S_w y S_s a través de una regresión lineal (figuras D.7 y D.8).

Tabla D.10: Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).

TRATAMIENTO 04 (T ₄)				
$t(s)$	ΔM_t^w	ΔM_t^s	$t/\Delta M_t^w$	$t/\Delta M_t^s$
1800	0.139	0.058	12915.132	30985.547
3600	0.177	0.070	20347.243	51286.282
5400	0.216	0.085	24976.059	63614.950
7200	0.259	0.092	27810.855	78507.747
10800	0.294	0.098	36741.479	109940.362
14400	0.352	0.108	40943.739	133131.616
18000	0.374	0.110	48176.726	163324.823
21600	0.420	0.122	51488.316	176800.906

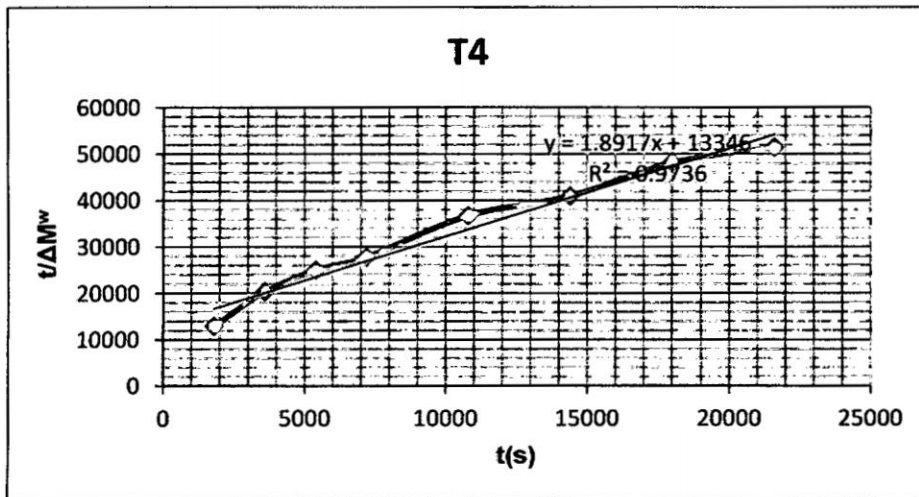


Figura D.7: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t

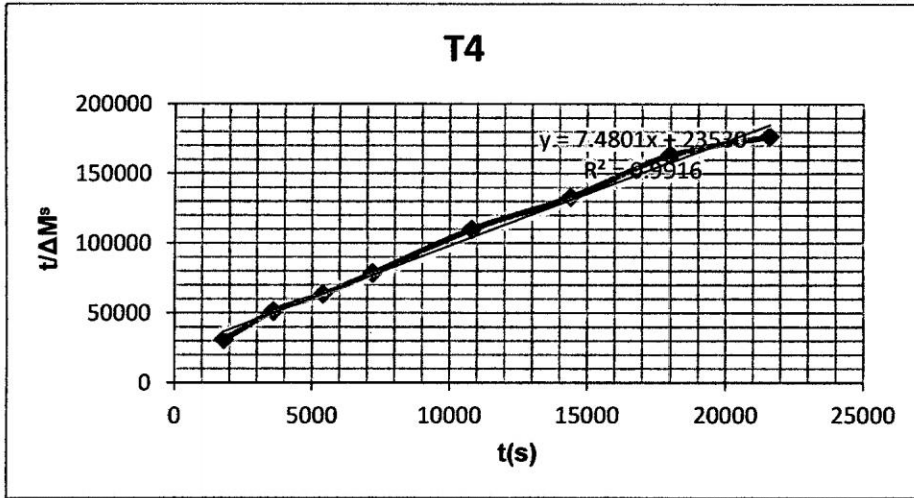


Figura D.8: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t

Los valores de S_w , S_s , ΔM_∞^w y ΔM_∞^s se obtienen a partir de la linealización de la ecuación (D.1) relacionándolos con la constante b y la pendiente m (obtenidos gráficamente, figuras D.7 y D.8) en la ecuación (D.2).

Tabla D.11: Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s

m	$= 1.89170$	m	$= 7.48010$
b	$= 13346.00$	b	$= 23530.00$
R^2	$= 0.97360$	R^2	$= 0.99160$
ΔM_∞^w	$= 0.52863$	ΔM_∞^s	$= 0.13369$
s	$= 0.00014$	s	$= 0.00032$
l	$= 0.01000$	l	$= 0.01000$
π	$= 3.14159$	π	$= 3.14159$
t	$= 21600.00$	t	$= 21600.00$

Con los valores obtenidos (tabla D.11) se procede a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para un tiempo de proceso de 6 horas ($t = 21600$ segundos) y dimensión característica del modelo (la mitad del espesor del cubo, $l = 0,01$ metros); los valores de m , b , R^2 , ΔM_∞^j , s y π son adimensionales. Reemplazando en las ecuaciones (D.4) y (D.5) respectivamente se obtienen: $D_e^w = 3,5135E - 09 \frac{m^2}{s}$ y $D_e^s = 3,5266E - 09 \frac{m^2}{s}$.

De la misma manera con los mismos valores obtenidos en la tabla D.11 se procede

a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso, las cuales se muestra en la tabla D.12:

Tabla D.12: Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso

$t(s)$	D_e^w	$t(s)$	D_e^s
1800	$\Rightarrow 3.6688E-08$	1800	$\Rightarrow 3.8770E-08$
3600	$\Rightarrow 2.1954E-08$	3600	$\Rightarrow 2.2055E-08$
5400	$\Rightarrow 1.5121E-08$	5400	$\Rightarrow 1.4498E-08$
7200	$\Rightarrow 1.1135E-08$	7200	$\Rightarrow 1.1013E-08$
10800	$\Rightarrow 7.6918E-09$	10800	$\Rightarrow 7.5314E-09$
14400	$\Rightarrow 5.4861E-09$	14400	$\Rightarrow 5.5063E-09$
18000	$\Rightarrow 4.4111E-09$	18000	$\Rightarrow 4.4576E-09$
21600	$\Rightarrow 3.5135E-09$	21600	$\Rightarrow 3.5266E-09$

Las difusividades efectivas medias $\overline{D_e^w}$ y $\overline{D_e^s}$ fueron calculados haciéndose una media aritmética de los valores de difusividad encontrados para cada tiempo y reemplazando en la ecuación (D.6), obteniéndose: $\overline{D_e^w} = 1,3250E - 08 \frac{m^2}{s}$ y $\overline{D_e^s} = 1,3420E - 08 \frac{m^2}{s}$.

D.5. Tratamiento 05 (T_5)

En la tabla D.13 se muestra los datos experimentales de fracción de agua perdido (ΔM_t^w) por el alimento, fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) por el alimento obtenidos para los diferentes tiempos (t) y las relaciones $t/\Delta M_t^w$ y $t/\Delta M_t^s$ obtenidos para el cálculo de ΔM_∞^w , ΔM_∞^s , S_w y S_s a través de una regresión lineal (figuras D.9 y D.10).

Tabla D.13: Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).

TRATAMIENTO 05 (T ₅)				
$t(s)$	ΔM_t^w	ΔM_t^s	$t/\Delta M_t^w$	$t/\Delta M_t^s$
1800	0.124	0.025	14469.553	71020.602
3600	0.160	0.030	22556.469	119867.352
5400	0.189	0.045	28607.156	119862.852
7200	0.186	0.052	38654.417	139591.522
10800	0.240	0.060	44978.534	180065.226
14400	0.236	0.068	61081.102	211432.704
18000	0.261	0.073	68911.622	246572.762
21600	0.290	0.089	74489.057	242419.622

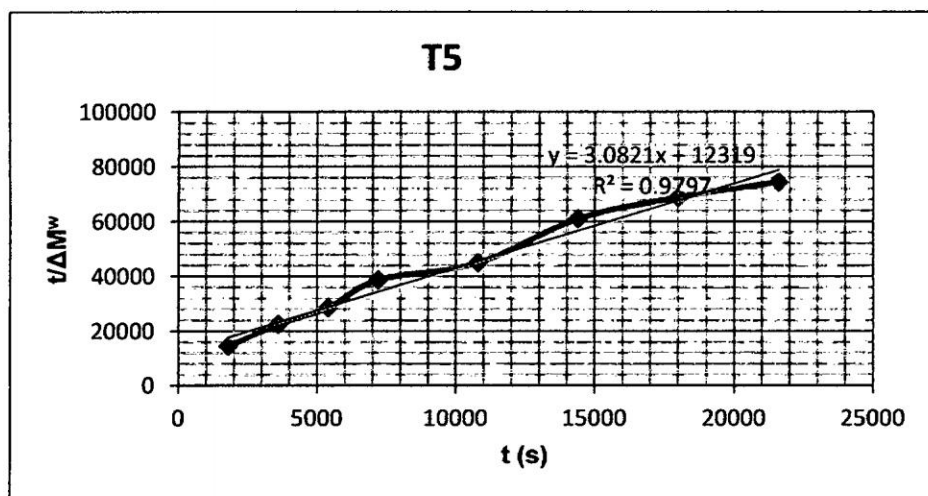


Figura D.9: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t

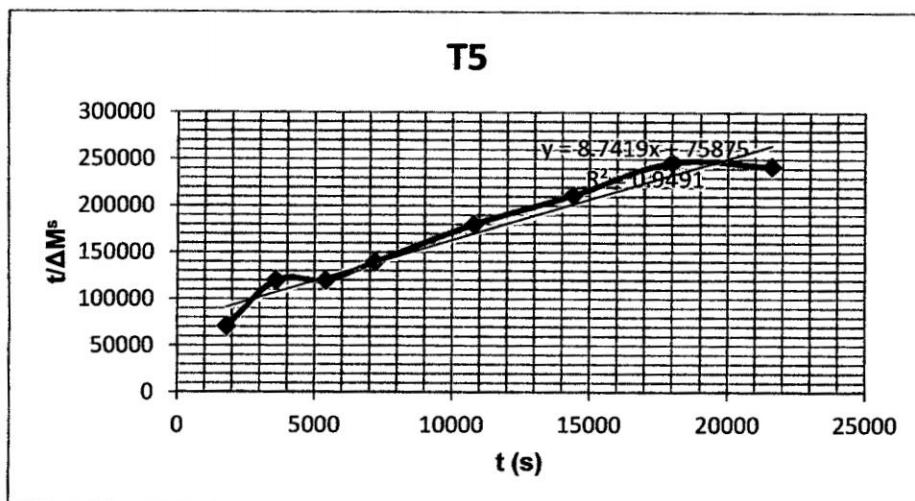


Figura D.10: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t

Los valores de S_w , S_s , ΔM_∞^w y ΔM_∞^s se obtienen a partir de la linealización de la ecuación (D.1) relacionándolos con la constante b y la pendiente m (obtenidos gráficamente, figuras D.9 y D.10) en la ecuación (D.2).

Tabla D.14: Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s

m	$= 3.08210$	m	$= 8.74190$
b	$= 12319.00$	b	$= 75875.00$
R^2	$= 0.97970$	R^2	$= 0.94910$
ΔM_∞^w	$= 0.32445$	ΔM_∞^s	$= 0.11439$
s	$= 0.00025$	s	$= 0.00012$
l	$= 0.01000$	l	$= 0.01000$
π	$= 3.14159$	π	$= 3.14159$
t	$= 21600.00$	t	$= 21600.00$

Con los valores obtenidos (tabla D.14) se procede a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para un tiempo de proceso de 6 horas ($t = 21600$ segundos) y dimensión característica del modelo (la mitad del espesor del cubo, $l = 0,01$ metros); los valores de m , b , R^2 , ΔM_∞^j , s y π son adimensionales. Reemplazando en las ecuaciones (D.4) y (D.5) respectivamente se obtienen: $D_e^w = 3,4995E - 09 \frac{m^2}{s}$ y $D_e^s = 3,4291E - 09 \frac{m^2}{s}$.

De la misma manera con los mismos valores obtenidos en la tabla D.14 se procede

a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso, las cuales se muestra en la tabla D.15:

Tabla D.15: Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso

$t(s)$	D_e^w	$t(s)$	D_e^s
1800	$\Rightarrow 3.7910E-08$	1800	$\Rightarrow 3.6822E-08$
3600	$\Rightarrow 2.1280E-08$	3600	$\Rightarrow 2.3482E-08$
5400	$\Rightarrow 1.4425E-08$	5400	$\Rightarrow 1.4290E-08$
7200	$\Rightarrow 1.1765E-08$	7200	$\Rightarrow 1.0949E-08$
10800	$\Rightarrow 7.2054E-09$	10800	$\Rightarrow 7.5480E-09$
14400	$\Rightarrow 5.7315E-09$	14400	$\Rightarrow 5.6271E-09$
18000	$\Rightarrow 4.4110E-09$	18000	$\Rightarrow 4.5282E-09$
21600	$\Rightarrow 3.4995E-09$	21600	$\Rightarrow 3.4291E-09$

Las difusividades efectivas medias $\overline{D_e^w}$ y $\overline{D_e^s}$ fueron calculados haciéndose una media aritmética de los valores de difusividad encontrados para cada tiempo y reemplazando en la ecuación (D.6), obteniéndose: $\overline{D_e^w} = 1,3279E - 08 \frac{m^2}{s}$ y $\overline{D_e^s} = 1,3334E - 08 \frac{m^2}{s}$.

D.6. Tratamiento 06 (T_6)

En la tabla D.16 se muestra los datos experimentales de fracción de agua perdido (ΔM_t^w) por el alimento, fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) por el alimento obtenidos para los diferentes tiempos (t) y las relaciones $t/\Delta M_t^w$ y $t/\Delta M_t^s$ obtenidos para el cálculo de ΔM_∞^w , ΔM_∞^s , S_w y S_s a través de una regresión lineal (figuras D.11 y D.12).

Tabla D.16: Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).

TRATAMIENTO 06 (T ₆)				
$t(s)$	ΔM_t^w	ΔM_t^s	$t / \Delta M_t^w$	$t / \Delta M_t^s$
1800	0.177	0.009	10185.840	192640.670
3600	0.227	0.017	15858.954	210569.682
5400	0.301	0.021	17965.375	254880.316
7200	0.274	0.026	26311.055	275413.627
10800	0.361	0.033	29951.634	324779.929
14400	0.404	0.040	35663.828	363072.226
18000	0.448	0.045	40212.327	403871.023
21600	0.517	0.054	41741.984	396422.200

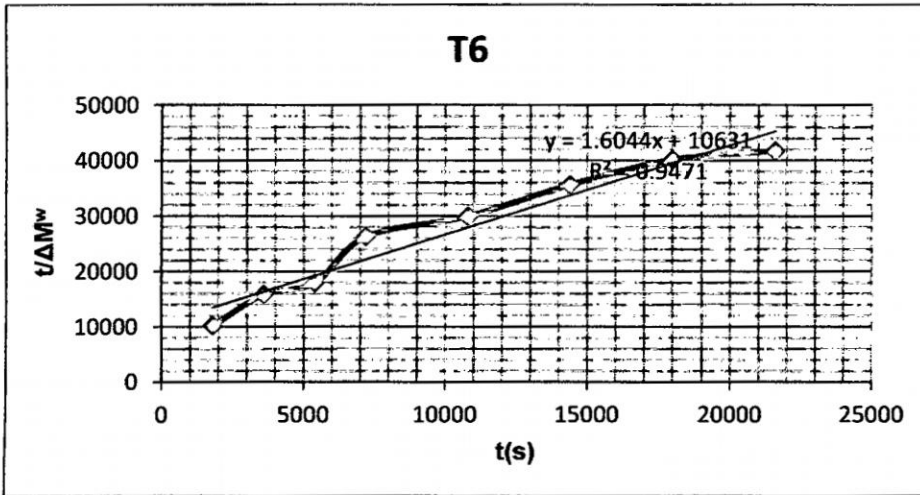


Figura D.11: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t

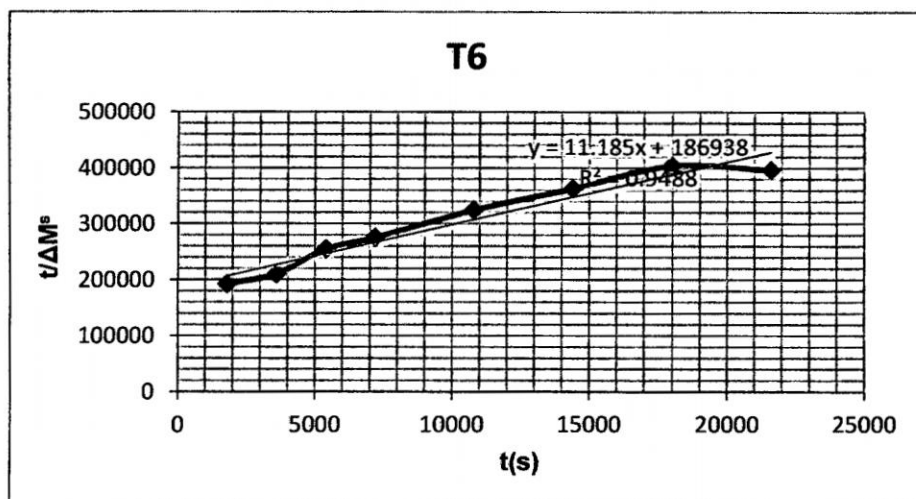


Figura D.12: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t

Los valores de S_w , S_s , ΔM_∞^w y ΔM_∞^s se obtienen a partir de la linealización de la ecuación (D.1) relacionándolos con la constante b y la pendiente m (obtenidos gráficamente, figuras D.11 y D.12) en la ecuación (D.2).

Tabla D.17: Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s

m	$= 1.60440$	m	$= 11.18500$
b	$= 10631.00$	b	$= 186938.00$
R^2	$= 0.94710$	R^2	$= 0.94880$
ΔM_∞^w	$= 0.62329$	ΔM_∞^s	$= 0.08941$
s	$= 0.00015$	s	$= 0.00006$
l	$= 0.01000$	l	$= 0.01000$
π	$= 3.14159$	π	$= 3.14159$
t	$= 21600.00$	t	$= 21600.00$

Con los valores obtenidos (tabla D.17) se procede a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para un tiempo de proceso de 6 horas ($t = 21600$ segundos) y dimensión característica del modelo (la mitad del espesor del cubo, $l = 0,01$ metros); los valores de m , b , R^2 , ΔM_∞^j , s y π son adimensionales. Reemplazando en las ecuaciones (D.4) y (D.5) respectivamente se obtienen: $D_e^w = 3,4438E - 09 \frac{m^2}{s}$ y $D_e^s = 3,4521E - 09 \frac{m^2}{s}$.

De la misma manera con los mismos valores obtenidos en la tabla D.17 se procede

a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso, las cuales se muestra en la tabla D.18:

Tabla D.18: Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso

$t(s)$	D_e^w	$t(s)$	D_e^s
1800	$\Rightarrow 3.6129E-08$	1800	$\Rightarrow 4.1582E-08$
3600	$\Rightarrow 2.1328E-08$	3600	$\Rightarrow 2.0738E-08$
5400	$\Rightarrow 1.3868E-08$	5400	$\Rightarrow 1.4839E-08$
7200	$\Rightarrow 1.2223E-08$	7200	$\Rightarrow 1.1123E-08$
10800	$\Rightarrow 7.6138E-09$	10800	$\Rightarrow 7.5383E-09$
14400	$\Rightarrow 5.6602E-09$	14400	$\Rightarrow 5.6105E-09$
18000	$\Rightarrow 4.4149E-09$	18000	$\Rightarrow 4.4795E-09$
21600	$\Rightarrow 3.4438E-09$	21600	$\Rightarrow 3.4521E-09$

Las difusividades efectivas medias $\overline{D_e^w}$ y $\overline{D_e^s}$ fueron calculados haciéndose una media aritmética de los valores de difusividad encontrados para cada tiempo y reemplazando en la ecuación (D.6), obteniéndose: $\overline{D_e^w} = 1,3085E - 08 \frac{m^2}{s}$ y $\overline{D_e^s} = 1,3670E - 08 \frac{m^2}{s}$.

D.7. Tratamiento 07 (T_7)

En la tabla D.19 se muestra los datos experimentales de fracción de agua perdido (ΔM_t^w) por el alimento, fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) por el alimento obtenidos para los diferentes tiempos (t) y las relaciones $t/\Delta M_t^w$ y $t/\Delta M_t^s$ obtenidos para el cálculo de ΔM_∞^w , ΔM_∞^s , S_w y S_s a través de una regresión lineal (figuras D.13 y D.14).

Tabla D.19: Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).

TRATAMIENTO 07 (T ₇)				
$t(s)$	ΔM_t^w	ΔM_t^s	$t/\Delta M_t^w$	$t/\Delta M_t^s$
1800	0.177	0.026	10160.125	69366.526
3600	0.230	0.029	15628.648	122681.662
5400	0.273	0.030	19761.491	178433.825
7200	0.301	0.038	23941.236	187377.321
10800	0.331	0.046	32633.781	234865.679
14400	0.383	0.054	37616.723	267491.305
18000	0.393	0.070	45849.296	255595.321
21600	0.434	0.065	49770.433	333649.852

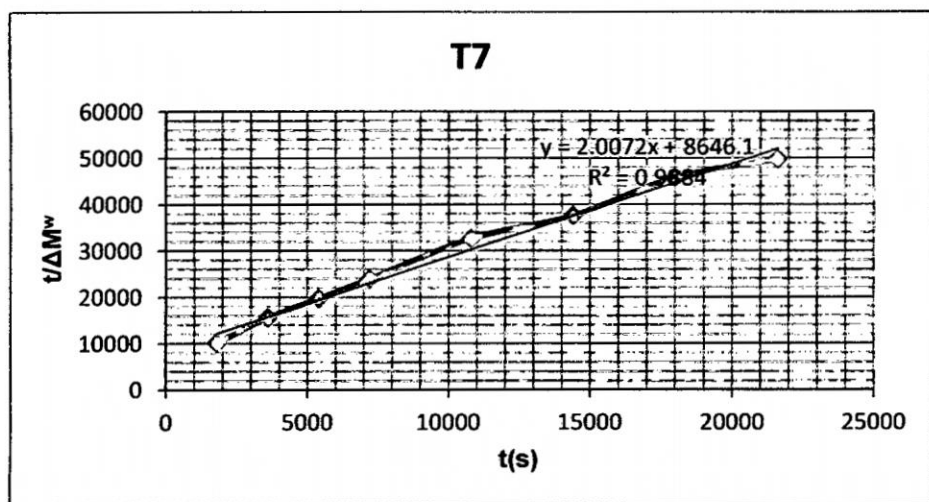


Figura D.13: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t

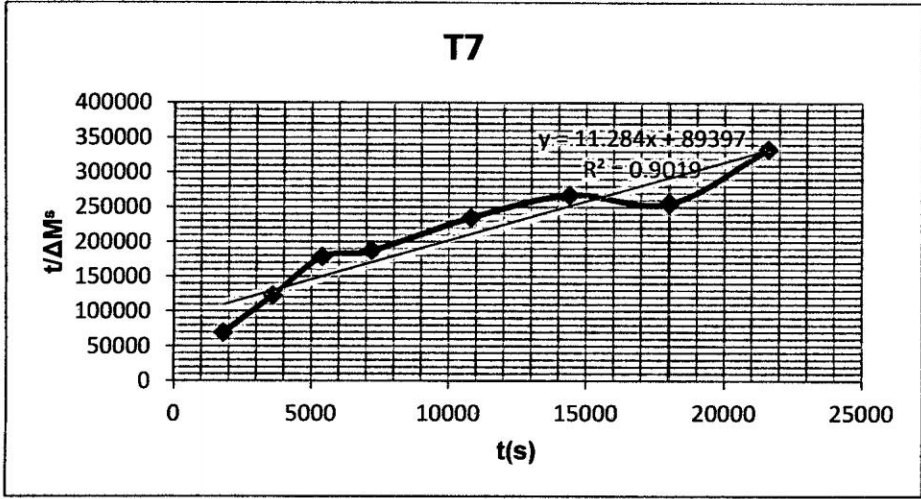


Figura D.14: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t

Los valores de S_w , S_s , ΔM_∞^w y ΔM_∞^s se obtienen a partir de la linealización de la ecuación (D.1) relacionándolos con la constante b y la pendiente m (obtenidos gráficamente, figuras D.13 y D.14) en la ecuación (D.2).

Tabla D.20: Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s

m	$= 2.00720$	m	$= 11.28400$
b	$= 8646.10$	b	$= 89397.00$
R^2	$= 0.98840$	R^2	$= 0.90190$
ΔM_∞^w	$= 0.49821$	ΔM_∞^s	$= 0.08862$
s	$= 0.00023$	s	$= 0.00013$
l	$= 0.01000$	l	$= 0.01000$
π	$= 3.14159$	π	$= 3.14159$
t	$= 21600.00$	t	$= 21600.00$

Con los valores obtenidos (tabla D.20) se procede a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para un tiempo de proceso de 6 horas ($t = 21600$ segundos) y dimensión característica del modelo (la mitad del espesor del cubo, $l = 0,01$ metros); los valores de m , b , R^2 , ΔM_∞^j , s y π son adimensionales. Reemplazando en las ecuaciones (D.4) y (D.5) respectivamente se obtienen: $D_e^w = 3,5313E - 09 \frac{m^2}{s}$ y $D_e^s = 3,6399E - 09 \frac{m^2}{s}$.

De la misma manera con los mismos valores obtenidos en la tabla D.20 se procede

a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso, las cuales se muestra en la tabla D.21:

Tabla D.21: Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso

$t(s)$	D_e^w	$t(s)$	D_e^s
1800	$\Rightarrow 3.8499E-08$	1800	$\Rightarrow 3.2143E-08$
3600	$\Rightarrow 2.1593E-08$	3600	$\Rightarrow 2.0988E-08$
5400	$\Rightarrow 1.4682E-08$	5400	$\Rightarrow 1.6305E-08$
7200	$\Rightarrow 1.1172E-08$	7200	$\Rightarrow 1.1610E-08$
10800	$\Rightarrow 7.6370E-09$	10800	$\Rightarrow 7.8042E-09$
14400	$\Rightarrow 5.4606E-09$	14400	$\Rightarrow 5.6772E-09$
18000	$\Rightarrow 4.4328E-09$	18000	$\Rightarrow 3.9880E-09$
21600	$\Rightarrow 3.5313E-09$	21600	$\Rightarrow 3.6399E-09$

Las difusividades efectivas medias $\overline{D_e^w}$ y $\overline{D_e^s}$ fueron calculados haciéndose una media aritmética de los valores de difusividad encontrados para cada tiempo y reemplazando en la ecuación (D.6), obteniéndose: $\overline{D_e^w} = 1,3376E - 08 \frac{m^2}{s}$ y $\overline{D_e^s} = 1,2769E - 08 \frac{m^2}{s}$.

D.8. Tratamiento 08 (T_8)

En la tabla D.22 se muestra los datos experimentales de fracción de agua perdido (ΔM_t^w) por el alimento, fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) por el alimento obtenidos para los diferentes tiempos (t) y las relaciones $t/\Delta M_t^w$ y $t/\Delta M_t^s$ obtenidos para el cálculo de ΔM_∞^w , ΔM_∞^s , S_w y S_s a través de una regresión lineal (figuras D.15 y D.16).

Tabla D.22: Fracción de agua perdido (ΔM_t^w) y fracción de sólidos solubles ganados (ΔM_t^s) obtenidos para los diferentes tiempos (t).

TRATAMIENTO 08 (T ₈)				
$t(s)$	ΔM_t^w	ΔM_t^s	$t / \Delta M_t^w$	$t / \Delta M_t^s$
1800	0.210	0.027	8587.072	65490.263
3600	0.261	0.050	13791.227	72557.859
5400	0.294	0.065	18369.448	83456.396
7200	0.330	0.069	21809.391	103976.810
10800	0.379	0.068	28495.068	158318.546
14400	0.427	0.071	33728.558	202540.079
18000	0.461	0.086	39051.395	209250.250
21600	0.508	0.086	42538.165	250953.245

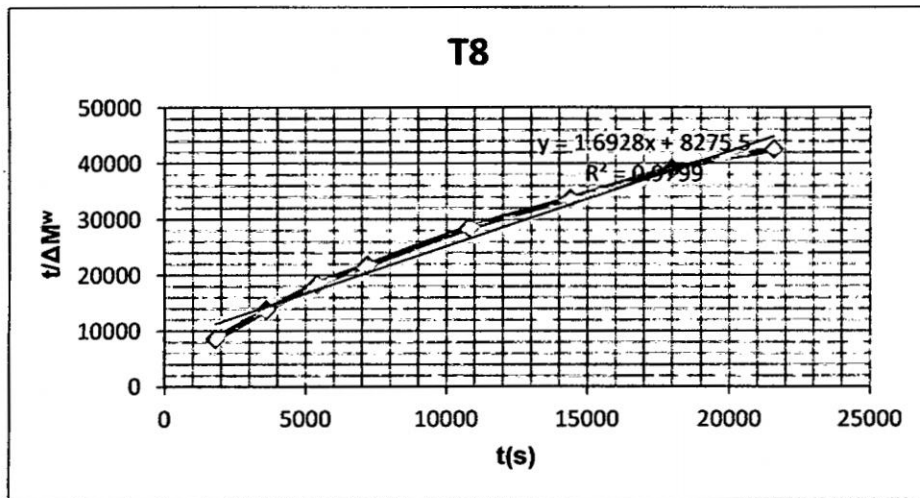


Figura D.15: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^w obtenidos durante un periodo de tiempo t

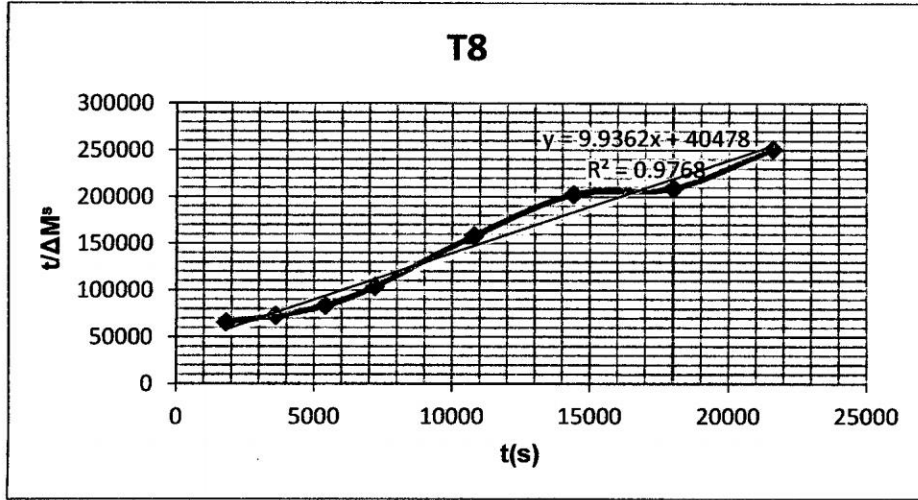


Figura D.16: Regresión lineal usando datos experimentales de ΔM_t^s obtenidos durante un periodo de tiempo t

Los valores de S_w , S_s , ΔM_∞^w y ΔM_∞^s se obtienen a partir de la linealización de la ecuación (D.1) relacionándolos con la constante b y la pendiente m (obtenidos gráficamente, figuras D.15 y D.16) en la ecuación (D.2).

Tabla D.23: Valores obtenidos para el cálculo de D_e^w y D_e^s

m	$= 1.69280$	m	$= 9.93620$
b	$= 8275.50$	b	$= 40478.00$
R^2	$= 0.97990$	R^2	$= 0.97680$
ΔM_∞^w	$= 0.59074$	ΔM_∞^s	$= 0.10064$
s	$= 0.00020$	s	$= 0.00025$
l	$= 0.01000$	l	$= 0.01000$
π	$= 3.14159$	π	$= 3.14159$
t	$= 21600.00$	t	$= 21600.00$

Con los valores obtenidos (tabla D.23) se procede a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para un tiempo de proceso de 6 horas ($t = 21600$ segundos) y dimensión característica del modelo (la mitad del espesor del cubo, $l = 0,01$ metros); los valores de m , b , R^2 , ΔM_∞^j , s y π son adimensionales. Reemplazando en las ecuaciones (D.4) y (D.5) respectivamente se obtienen: $D_e^w = 3,5106E - 09 \frac{m^2}{s}$ y $D_e^s = 3,5966E - 09 \frac{m^2}{s}$.

De la misma manera con los mismos valores obtenidos en la tabla D.23 se procede

a calcular las difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso, las cuales se muestra en la tabla D.24:

Tabla D.24: Difusividades efectivas D_e^w y D_e^s para cada tiempo de proceso

$t(s)$	D_e^w	$t(s)$	D_e^s
1800	$\Rightarrow 3.6287E-08$	1800	$\Rightarrow 4.7117E-08$
3600	$\Rightarrow 2.1227E-08$	3600	$\Rightarrow 2.1107E-08$
5400	$\Rightarrow 1.5070E-08$	5400	$\Rightarrow 1.3423E-08$
7200	$\Rightarrow 1.1381E-08$	7200	$\Rightarrow 1.0380E-08$
10800	$\Rightarrow 7.6217E-09$	10800	$\Rightarrow 7.6136E-09$
14400	$\Rightarrow 5.5734E-09$	14400	$\Rightarrow 5.8239E-09$
18000	$\Rightarrow 4.3862E-09$	18000	$\Rightarrow 4.2286E-09$
21600	$\Rightarrow 3.5106E-09$	21600	$\Rightarrow 3.5966E-09$

Las difusividades efectivas medias $\overline{D_e^w}$ y $\overline{D_e^s}$ fueron calculados haciéndose una media aritmética de los valores de difusividad encontrados para cada tiempo y reemplazando en la ecuación (D.6), obteniéndose: $\overline{D_e^w} = 1,3132E - 08 \frac{m^2}{s}$ y $\overline{D_e^s} = 1,4161E - 08 \frac{m^2}{s}$.

Apéndice E

Fotografías



Figura E.1: Frutos de papaya empleados para los ensayos de deshidratación osmótica

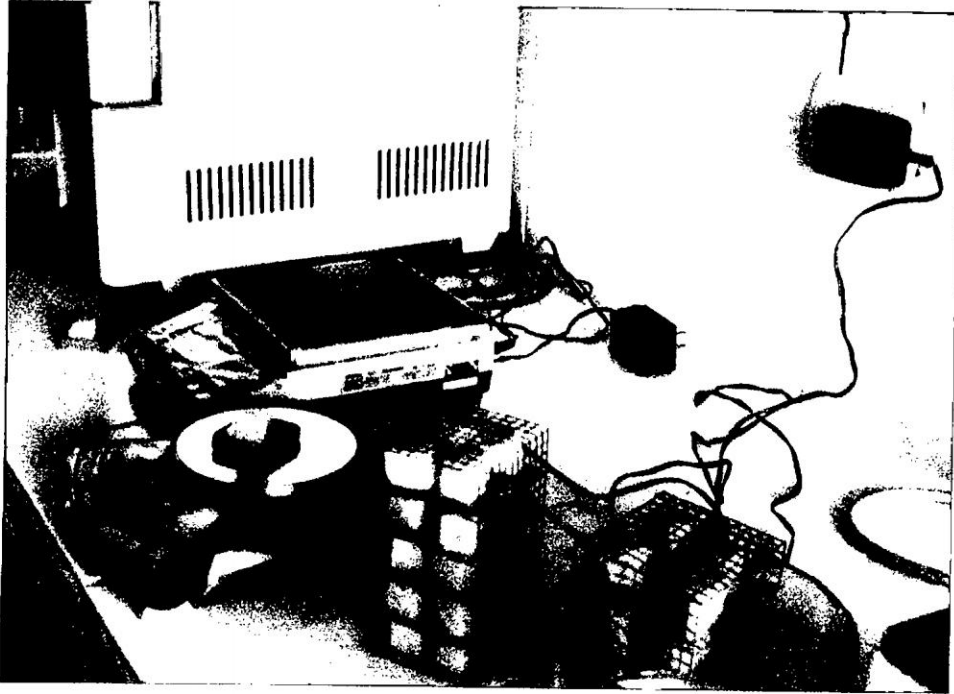


Figura E.2: Muestras previamente pesadas e identificadas fueron colocados en cestas compartimentadas de geometría cuadrada.



Figura E.3: Como agente osmótico se emplearon soluciones de sacarosa y jarabe de glucosa, preparados en agua destilada.

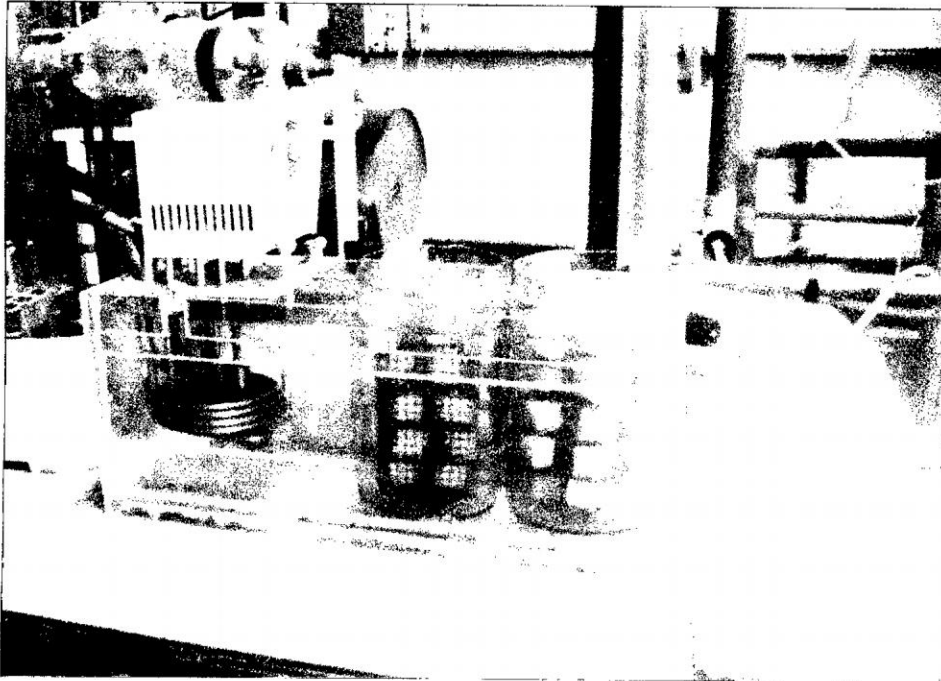


Figura E.4: Reproducibilidad de las cinéticas de transferencia de masa de acuerdo al *diseño experimental*.

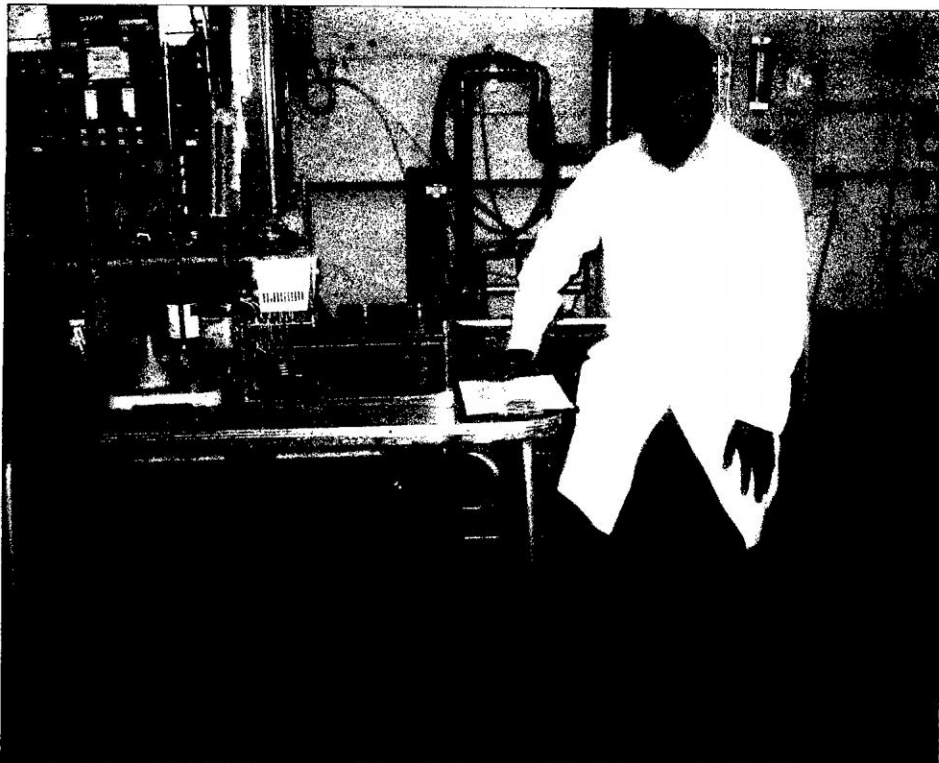


Figura E.5: Ensayos de deshidratación osmótica, Lab. *Transferencia de Masa*, Ciudad Universitaria, UNSCH.

Apéndice F

Matriz de consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA

ESTUDIO DEL EFECTO DE TRES FACTORES EN LA CINÉTICA DE TRANSFERENCIA DE MASA DE PAPAYA (*Carica papaya*) DESHIDRATADO OSMÓTICAMENTE

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
¿En qué grado la deshidratación osmótica con dos tipos de agentes osmóticos, temperatura de proceso y concentración de la disolución variables, ocasionan cambios sobre los parámetros cinéticos y difusionales de la deshidratación de trozos de papaya (<i>Carica papaya</i>)?	<p>1. OBJETIVO GENERAL</p> <p>✓ Estudiar el efecto de la temperatura de proceso, concentración de la disolución y tipo de agente osmótico usado, en la cinética de transferencia de masa de papaya (<i>Carica papaya</i>) deshidratado osmóticamente.</p> <p>2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>✓ Determinar y evaluar los parámetros cinéticos del proceso (perdida de agua, ganancia de soluto y pérdida de masa) durante la deshidratación osmótica.</p> <p>✓ Evaluar la cinética de deshidratación en función del tiempo para cada interacción de las variables de proceso a distintos niveles.</p> <p>✓ Determinar el modelo matemático de transferencia de masa para la deshidratación osmótica de papaya.</p>	<p>La concentración y la temperatura de la disolución, influyen de modo distinto sobre los parámetros cinéticos y difusionales según que agente osmótico se utilice en la deshidratación osmótica de papaya (<i>Carica papaya</i>).</p>	<p>1. VARIABLE INDEPENDIENTE</p> <p>X_I. Concentración de la disolución. X_2. Temperatura de la disolución. X_3. Agente osmótico de la disolución.</p> <p><u>Indicadores:</u></p> <p>X_I. Disolución osmótica a 40 y 60 °Brix. X_{II}. Temperatura de proceso a 30 y 40 °C. X_{III}. Uso de la Sacarosa y glucosa como solutos.</p> <p>2. VARIABLE DEPENDIENTE</p> <p>Y. Parámetros cinéticos y difusionales del proceso.</p> <p><u>Indicadores:</u></p> <p>Y_I. Pérdida de agua (% PA). Y_{II}. Ganancia de soluto (% GS). Y_{III}. Pérdida de masa (% PP). Y_{IV}. Difusividades efectivas medias \bar{D}_e.</p>	<p>1. TIPO DE INVESTIGACION - Básico – Aplicada</p> <p>2. NIVEL DE INVESTIGACION - Experimental</p> <p>3. METODO - Descriptivo - Analítico - Comparativo - Estadístico</p> <p>4. DISEÑO - Experimental</p> <p>5. POBLACION - Papayas de la variedad criolla (<i>Carica papaya</i>) provenientes del VRAE.</p> <p>6. MUESTRA - Trozos de papaya en forma de cubos (20 mm).</p> <p>7. TECNICAS - Experimentación - Observación</p> <p>8. INSTRUMENTOS - Guía de métodos de análisis. - Equipos de medición.</p>

Tabla F.1: Matriz de consistencia