

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZONICA
DE MADRE DE DIOS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERIA
AGROINDUSTRIAL**



**"MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LA
TRANSFERENCIA DE SACAROSA EN LA
DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DEL FRUTO DE LA
CARAMBOLA
(*Averrhoa carambola* L.)"**

TESIS:

Presentado Por:

CARMEN LIZ SANDRA SOLIS MALAGA

Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

PUERTO MALDONADO – PERÚ

2010



**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZONICA
DE MADRE DE DIOS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARRERA PROFESIONAL DE
INGENIERIA AGROINDUSTRIAL**

**“MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LA
TRANSFERENCIA DE SACAROSA EN LA
DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DEL FRUTO DE
LA CARAMBOLA
(*Averrhoa carambola L.*)”**

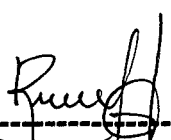
Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

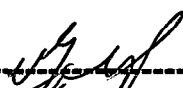
Presentado por la Bachiller:

CARMEN LIZ SANDRA SOLIS MALAGA

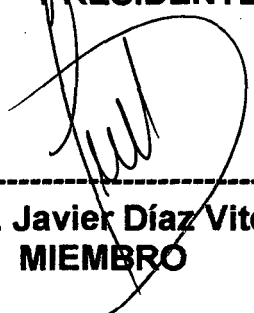
SUSTENTADA Y APROBADA ANTE EL SIGUIENTE JURADO:



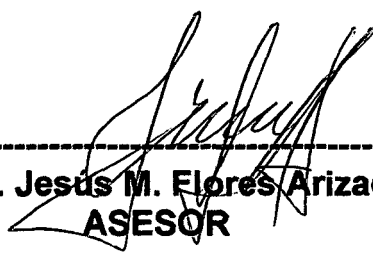
Ing. Raúl Huamán Cruz
PRESIDENTE



Ing. Mg. María I. Cajo Pinche
SECRETARIA



Ing. Javier Díaz Viteri
MIEMBRO



Ing. Jesús M. Flores Arizaca
ASESOR

PUERTO MALDONADO – PERÚ

2010

DEDICATORIA

Con Eterna Gratitud

A DIOS:

Por haberme dado la oportunidad de llegar a la meta
y sin cuya ayuda no hubiera
logrado alcanzar.

Al pedacito de mi ser
que es la inspiración de mi vida y la fuerza de seguir adelante.

A mis padres:

Amelia que me apoyó y acompañó
incondicionalmente durante
todo mi carrera universitaria.

Leocadio, que me animo a seguir adelante
en todos los momentos de vida universitaria.

A mi hermana Elizabeth por su
colaboración incondicional en el
logro de mis anhelos.

A mi tía María por todo su apoyo y sus consejos en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Jesús Flores Arizaca por brindarme los conocimientos y la ayuda necesaria para sacar adelante este trabajo de investigación.

Al Ing. Miguel Chávez Pinchi por el apoyo para realización de este trabajo de investigación.

A la Sra. Rocío gerente propietaria de la empresa agroindustrial INALA por su colaboración en la ejecución del trabajo experimental.

A mis amigos Rosita, Carlos, Palmer y Anita que me acompañaron e incentivaron a la culminación de este trabajo.

Y finalmente un agradecimiento muy especial a todas aquellas personas que colaboraron de forma directa e indirectamente a la realización del presente trabajo.

INDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
<i>Simbología</i>	iii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEORICO	4
2.1 ANTECEDENTES DE LA CARAMBOLA (<i>Averrhoa carambola</i> L.)	4
2.1.1 Origen e Historia	4
2.1.2 Características de Botánicas	4
2.1.2.1 Taxonomía y morfología	5
2.1.2.2 Histología	5
2.1.3 Características nutricionales	6
2.1.4 Variedades	7
2.1.5 Composición Fisicoquímica	8
2.1.6 Producción	9
2.1.7 Formas de aprovechamiento y conservación	10
2.2 SOLUCION OSMOTICA	11
2.2.1 Generalidades	11
2.2.2 Sacarosa	12
2.2.3 Propiedades físicas de la Solución Osmótica	12
2.3 DESHIDRATACION OSMOTICA	14
2.3.1 Factores que Influyen en la Velocidad de Deshidratación	15
2.4 MODELAMIENTO MATEMATICO EN LA DESHIDRATACION OSMOTICA	15
2.4.1 Descripción General de la Deshidratación Osmótica	15
2.4.2 Modelos para la Deshidratación Osmótica	17
2.4.3 Fenómenos de Transferencia de Masa en la Deshidratación Osmótica	23
A. Transferencia de Masa en la capa limite de la solución	24
B. Transferencia de Masa en el tejido	26
III. MATERIALES Y METODOLOGIA	35
3.1 LUGAR DE TRABAJO	35
3.2 MATERIALES	35

3.2.1 Materia Prima	35
3.2.2 Sacarosa (Azúcar comercial)	35
3.2.3 Reactivos	35
3.2.4 Equipos y Materiales de Laboratorio	36
3.3 METODOS ANALITICOS PARA CARACTERIZAR EL FRUTO	
DE LA CARAMBOLA (<i>Averrhoa carambola L.</i>)	37
3.3.1. Humedad	37
3.3.2. Grasa Total	37
3.3.3. Proteína	37
3.3.4. Ceniza	37
3.3.5. Fibra	38
3.3.6. Carbohidratos	38
3.3.7. Sólidos Solubles	38
3.3.8. pH	38
3.3.9. Acidez Titulable	38
3.3.10. Densidad	38
3.3.11. Índice de Madurez	38
3.4 METODO EXPERIMENTAL	38
3.4.1 Operaciones en el Proceso de Deshidratación Osmótica de la	
Carambola (<i>Averrhoa carambola L.</i>)	40
A. Selección y Clasificación	40
B. Lavado	40
C. Pelado	40
D. Cortado	40
E. Inmersión en Solución saturada de sacarosa	40
F. Drenado	41
G. Determinación de Humedad	41
H. Medición del Peso final de muestras	41
3.4.2 Diseño Experimental utilizando superficie de respuesta	42
3.4.3 Modelos Matemáticos de transferencia de sacarosa basados	
en leyes fundamentales	45

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	49
4.1 DEL FRUTO DE LA CARAMBOLA (<i>Averrhoa carambola</i> L.)	49
4.1.1. Características Físicas	49
4.1.2 Índice de Madurez	49
4.1.3 Análisis Físico-Químico	51
4.2 DEL AZUCAR Y LAS SOLUCIONES	52
4.3 DEL PROCESO DE DESHIDRATACION OSMOTICA	53
4.3.1 Acondicionamiento de la muestra	53
4.3.2 Análisis Microscópico de las muestras de Fruta antes y después de la Deshidratación Osmótica	55
4.3.3 Modelamiento del proceso de DO utilizando Diseños Experimentales	56
4.3.4 Pérdida de agua y ganancia de sólidos (azúcar)	56
4.3.5 Correlación de la Transferencia de Sacarosa utilizando Diseños Experimentales	60
4.3.5.1 Superficie de Respuesta	60
4.3.5.2 Efecto del tiempo de transferencia de Sacarosa	63
4.3.6 Modelamiento Matemático basado en Leyes Fundamentales para la Velocidad de Transferencia de Sacarosa	66
4.3.6.1 Efecto de la Concentración y Temperatura sobre la Transferencia de Sacarosa	71
V. CONCLUSIONES	73
VI. RECOMENDACIONES	75
VII. BIBLIOGRAFIA	76
VIII. ANEXOS	82
Anexo 1. Imágenes del Proceso de Acondicionamiento de los Equipos para la Deshidratación Osmótica de la carambola.	83
Anexo 2. Imágenes del Proceso de Acondicionamiento de las Soluciones de Sacarosa (Azúcar) para la Deshidratación Osmótica de la carambola.	84
Anexo 3. Imágenes del Tratamiento Térmico del fruto de la carambola antes de la Deshidratación Osmótica.	84
Anexo 4. Imágenes de Medición de Propiedades de la Solución de Sacarosa (Azúcar) para la Deshidratación Osmótica de la carambola.	85

Anexo 5. Imágenes del Proceso de Acondicionamiento de la materia prima (cubos de carambola) para la Deshidratación Osmótica.	86
Anexo 6. Imágenes de la toma de datos después del Proceso de Deshidratación Osmótica de la carambola.	86
Anexo 7. Imágenes del Proceso de Acondicionamiento de las Soluciones de Sacarosa (Azúcar) para la Deshidratación Osmótica de la carambola.	87
Anexo 8. Ganancia de Sólidos $GS_t = Y_1$	88
Anexo 9. Pérdida de Agua $PH_t = Y_2$	97
IX. GLOSARIO	106

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 2.1. Variedades de carambola introducidas o seleccionadas en Florida	8
Cuadro 2.2. Caracterización Fisicoquímica (<i>Averrhoa carambola</i> L.)	8
Cuadro 2.3. Composición Química Proximal (<i>Averrhoa carambola</i> L.)	9
Cuadro 2.4. Producción, Superficie y Rendimiento de la Carambola en el Perú	10
Cuadro 2.5. Producción, Superficie Cosecha y Rendimiento de la Carambola según Departamentos	10
Cuadro 2.6. Usos y Ventajas de Agentes Osmóticos	11
Cuadro 2.7. Propiedades Físicas y Valores del Azúcar a Diferentes Temperaturas y Concentraciones	13
Cuadro 3.1. Factores y Niveles de las Variables Independientes para el Diseño Compuesto Central	43
Cuadro 3.2. Matriz de Diseño Experimental Compuesto Central, con Niveles Codificados y Reales para el Análisis de los Efectos de las Variables Independientes en el Proceso de Deshidratación Osmótica del Fruto de la Carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.)	44
Cuadro 4.1. Características Físicas de la Carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.), seleccionada variedad ácida	49
Cuadro 4.2. Características del Índice de Madurez de la Carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.)	50
Cuadro 4.3. Análisis físico-Químico de la Matriz Solida de la Carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.) var. Acida (IM = 40.38 ± 2.05)	51
Cuadro 4.4. Análisis Químico del Azúcar Comercial Marca "CARTAVIO"	52
Cuadro 4.5. Propiedades Características de las Soluciones Utilizadas en las Pruebas Experimentales.	52

Cuadro 4.6. Efecto de las Variables Tiempo, Concentración de Solución, Relación Fruta: Solución y Temperatura en el Proceso de DO evaluados a través de la Ganancia de Sólidos, Pérdida de Agua y Reducción de Peso	57
Cuadro 4.7. Modelos de regresión completa para Ganancia de sólidos, Pérdida de agua y Reducción de peso, en DO de la carambola (<i>Averrhoa carambola L.</i>), variedad Ácida	58
Cuadro 4.8. Análisis de Varianza para el Modelo Ajustado Correspondiente a los Resultados de la Pérdida de Agua en el Proceso de DO de la Carambola (<i>Averrhoa carambola L.</i>) Variedad Ácida.	59
Cuadro 4.9. Valores más adecuados para las Variables Independientes en el Proceso de Deshidratación Osmótica de la carambola (<i>Averrhoa carambola L.</i>) variedad ácida.	59
Cuadro 4.10. Valores Máximos y Mínimos de las Variables Dependientes Obtenidos para el Proceso de Deshidratación Osmótica de la carambola (<i>Averrhoa carambola L.</i>), variedad ácida	60
Cuadro 4.11. Valores de las Variables Dependientes Calculadas a partir de las gráficas de Linealización mediante el Modelo de Azuara <i>et al</i> para el Proceso de DO de la carambola (<i>Averrhoa carambola L.</i>) variedad ácida	70
Cuadro 4.12. Parámetros de Ajuste Linealizado de las Variables Dependientes Obtenidos en el Proceso de Deshidratación Osmótica de la Carambola (<i>Averrhoa carambola L.</i>) variedad ácida	70

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1. Carambola (<i>variedad ácida</i>) fruto, hojas y flores	4
Figura 2.2. Corte transversal del fruto de carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.).	6
Figura 2.3. Mesocarpo de la baya de carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.)	6
Figura 2.4. Molécula de Sacarosa (β -D-fructofuranosil- α -D-glucopiranosida)	12
Figura 2.5. Hidrólisis de la Sacarosa	14
Figura 2.6. Tratamiento de deshidratación osmótica de un trozo de tejido de la fruta	16
Figura 2.7. Modelos de Concentración de solutos que involucran al tejido de la fruta	19
Figura 2.8. Modelos de Concentración de los solutos que dividen el tejido de la fruta	20
Figura 2.9. Transferencia de masa en el tejido en contacto con una solución Osmótica	21
Figura 2.10. Mecanismos Simplificado la Transferencia de Masa en la Deshidratación Osmótica	22
Figura 2.11. Etapas en la Contracción de una Célula	31
Figura 2.12. Volumen de Equilibrio de una celda unitaria (Toupin y Le Maguer, 1989)	32
Figura 3.1 Diagrama de Obtención de Muestra para la Deshidratación Osmótica del fruto de la Carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.), Variedad ácida	39
Figura 3.2. Esquema de la Obtención de los cubos de la fruta para el proceso de Deshidratación Osmótica del fruto de la carambola (<i>Averrhoa</i> <i>carambola</i> L.) Variedad acida.	42
Figura 4.1. Fruto de la carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.)	50
Figura 4.2. Curva de Calibración del Refractómetro para la Medición de Grados Brix	53
Figura 4.3. Materiales e Insumos Utilizados en el Desarrollo de las Pruebas Experimentales	54
Figura 4.4. Láminas de fruta fresca vistas al microscópico óptico 4x, antes de la Deshidratación Osmótica	55

Figura 4.5. Láminas de fruta deshidratada a la vista de un microscópico 4x después de la inmersión en solución saturada de sacarosa	55
Figura 4.6. Grafica de superficie de respuesta y contorno para la ganancia de sólidos durante la DO de la carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.), en función del tiempo y concentración de la solución	61
Figura 4.7. Grafica de superficie de respuesta y contorno para la ganancia de sólidos durante la DO de la carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.), en función a la relación fruta:solución con el tiempo	61
Figura 4.8. Grafica de superficie de respuesta y contorno para la ganancia de sólidos durante la DO de la carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.), en función del tiempo y temperatura	61
Figura 4.9 Grafica de superficie de respuesta y contorno para la ganancia de sólidos durante la DO de la carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.), en función a la concentración de la solución Vs. Temperatura	62
Figura 4.10. Grafica de superficie de respuesta y contorno para la Ganancia de sólidos durante la DO de la carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.), en función de relación fruta:solución y concentración de la solución	62
Figura 4.11 Grafica de superficie de respuesta y contorno para la Pérdida de Agua durante la DO de la carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.), en función de la temperatura y concentración de la solución	62
Figura 4.12. Grafica de superficie de respuesta y contorno para la Pérdida de Agua durante la DO de la carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.), en función a relación fruta:solución y tiempo	63
Figura 4.13. Grafica de superficie de respuesta y contorno para la Pérdida de Agua durante la DO de la carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.), en función de la temperatura Vs. Tiempo	63
Figura 4.14. Efecto de la temperatura de osmosis sobre la pérdida de humedad a una concentración de azúcar constante (65°Brix)	64

Figura 4.15. Efecto de la concentración de la solución osmótica sobre la pérdida de humedad a una temperatura constante (52°C)	65
Figura 4.16. Efecto de la relación fruta: solución osmótica sobre la pérdida de humedad a una concentración de azúcar constante (65°Brix)	65
Figura 4.17. Efecto de la temperatura de la solución osmótica sobre la ganancia de sólidos en la concentración de azúcar constante (65°Brix)	65
Figura 4.18. Efecto de la Concentración de la Solución Osmótica sobre la ganancia de sólidos a una temperatura constante (52°C)	66
Figura 4.19. Efecto de la relación fruta:solución osmótica sobre la ganancia de sólidos en la concentración de azúcar constante (65°Brix)	66
Figura 4.20. Grafico de Linealización de los datos según el modelo de Azuara et al, para la determinación de GS_{∞} y S_2 a una concentración de azúcar de 65°Brix y diferentes temperaturas	68
Figura 4.21. Grafico de Linealización de los datos según el modelo de Azuara et al, para la determinación de GS_{∞} y S_2 a una temperatura constante de 52°C y diferentes concentraciones	69
Figura 4.22. Grafico de Linealización de los datos según el modelo de Azuara et al, para la determinación de PH_{∞} y S_1 a una concentración de azúcar de 65°Brix y diferentes relaciones de fruta: solución osmótica	69
Figura 8.1: Reactor con Agitador y Termostato	83
Figura 8.2. Disposición del Equipo para la Deshidratación Osmótica.	83
Figura 8.3. Balanza Analítica de capacidad máxima 210g.	83
Figura 8.4. Refractómetro de Mano de escala 0 a 30°Brix y 0 a 80°Brix	84
Figura 8.5. Tratamiento térmico (Escaldado) del fruto seleccionado para DO	84
Figura 8.6. Fruta después del tratamiento térmico (escaldado)	84
Figura 8.7. Disposición de los cubos de fruta en el reactor	85
Figura 8.8. Registro de Datos Experimentales	85

Figura 8.9. Equipo Refractómetro Abbe, para medición de grados brix de la fruta y la soluciones de sacarosa	85
Figura 8.10. Pesado de la solución osmótica antes de La inmersión de los cubos de fruta	86
Figura 8.11. Proceso de Deshidratación Osmótica Del fruto de la carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.)	86
Figura 8.12. Preparación en Baño de Arena de la solución saturada de sacarosa a diferentes concentraciones	86
Figura 8.13. Determinando la viscosidad de la solución osmótica	87
Figura 8.14. Determinación de Fibra (Análisis Fisicoquímico de la matéria prima.	87
Figura 8.15. Preparación de los cubos de carambola	87
Figura 8.16. Cubos de carambola antes de iniciar el Tratamiento Osmótico	88
Figura 8.17. Proceso de Deshidratación Osmótica Del fruto de la carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.) en el Baño Maria	88
Figura 8.18. Medición de los Grados Brix de La solución osmótica durante la DO de los cubos de carambola	88
Figura 8.19. Cubos de fruta después del Proceso Osmótico	89
Figura 8.20. Materiales para la análisis de sólidos solubles en las diferentes pruebas experimentales en DO	.89
Figura 8.21. Disposición de los Cubos de Carambola en Inmersión	.89
Figura 8.22. Análisis al microscópio de las muestras antes y después de la Deshidratación Osmótica	90
Figura 8.23. Vista 1 al microscópio a 10x. porosidad de las muestras antes de la deshidratación osmótica	90
Figura 8.24. Vista 2 al microscópio a 4x. Estrutura celular de las Muestras antes de la Deshidratación Osmótica	90
Figura 8.25. Vista 3 al microscópio a 4x. Tejido Epitelial de las muestras antes de la deshidratación osmótica	91

Figura 8.26. Vista 4 al microscópio a 4x. Estrutura Celular de las muestras después de la Deshidratación Osmótica.	91
Figura 8.27. Cubos de carambola después del Proceso de DO y secados a la estufa a 60°C	91

RESUMEN

La deshidratación osmótica, constituye una tecnología con amplia perspectiva de aplicación en el procesamiento de alimentos y el fruto de la carambola (*Averrhoa carambola* L.) por poseer una estructura celular, que actúa como membrana semipermeable, facilita la observación del fenómeno de transferencia de la sacarosa en la matriz sólida y en consecuencia el modelamiento matemático de tal fenómeno.

El objetivo de la tesis fue establecer las condiciones más adecuadas del proceso de DO, con la finalidad de maximizar la pérdida de agua y minimizar el incremento de sólidos en el fruto de la carambola (*Averrhoa carambola* L.), variedad acida. El diseño experimental utilizado fue el diseño compuesto central con 3 repeticiones a 2 niveles y 4 factores, creando una matriz de diseño de 27 experimentos; la DO se realizó con trozos en forma de cubos de 1cm de lado, los que se sumergieron en las soluciones de sacarosa (50, 55, 60, 65 y 70 °Brix), con intervalos de tiempo (60, 120, 180, 240 y 300 min), temperatura (20, 30, 40, 50 y 60°C), relación F: S (1:7, 1:4, 3:8, 1:2 y 5:8). Después de la inmersión, los cubos se drenan para determinar el peso y humedad final. Se evaluó la ganancia de sólidos y pérdida de agua que alcanzaron valores de 3.42 gramos de azúcar/gramos de fruta fresca y 6.79 gramos de agua/gramos de fruta fresca respectivamente, con un error de $\pm 0.01g$. Las condiciones más adecuadas fueron: Tiempo 150 min, Concentración de Solución 65 °Brix, Relación Fruta/Solución 1:4 y Temperatura 50 °C; con las cuales se obtiene una pérdida de agua de 3.15 a 6.65 y una ganancia de sólidos de 0.87 a 3.42 con un ajuste de R^2 de 0.994-0.999. Así mismo, se establecieron modelos basados en los primeros principios, con la finalidad de hallar los parámetros difusivos que describan la transferencia de sacarosa en el proceso de DO de los cubos de carambola (*Averrhoa carambola* L.).

El modelo planteado predice los puntos de equilibrio en función al tiempo, así como la pérdida de humedad PH_{∞} y la ganancia de sólidos GS_{∞} en estado de equilibrio poseen un coeficiente de determinación $R^2 = 0.999$. Los valores de difusividad de pérdida de agua S_1 con valores de 0.004 - 0.17 para las interacciones a diferentes concentraciones de la solución y de 0.17 a 0.02 para las interacciones de la relación de F: S y por ultimo para la temperatura de 0.003; los coeficientes de difusividad de la ganancia de sólidos S_2 presentaron valores de -0.02 constantes para las interacciones a diferentes concentraciones de la solución y de 1.59 a 2.20 para las interacciones de la relación de fruta: solución saturada y por último la temperatura de 1.27 a 1.58. Los valores de R^2 presentaron una variabilidad de 0.84 a 0.99 demostrándose el buen ajuste de los datos experimentales.

ABSTRACT

Osmotic dehydration, is a technology with broad application perspective in the food processing and the fruit of carambola (*Averrhoa carambola* L.) due to a cellular structure that acts as a semipermeable membrane, facilitates the observation of the phenomenon of transfer sucrose in the solid matrix and hence the mathematical modeling of such phenomena.

The aim of the thesis was to establish the most suitable of the OD process, in order to maximize water loss and minimize the increase in solids in the fruit of carambola (*Averrhoa carambola* L.), sour variety. The experimental design was a central composite design with 3 replications at 2 levels and 4 factors, creating a design matrix of 27 experiments, the DO was made with pieces into cubes of 1cm from the side, which were immersed in solutions sucrose (50, 55, 60, 65 and 70 °Brix), with intervals of time (60, 120, 180, 240 and 300 min), temperature (20, 30, 40, 50 and 60 °C), relation F:S (1:7, 1:4, 3:8, 1:2 and 5:8). After immersion, the cubes are drained to determine the final weight and moisture. We evaluated the solid gain and water loss reaching values of 3.42 grams of sugar / gram of fresh fruit and 6.79 g water / g of fresh fruit, respectively, with an error of ± 0.01 g. The most suitable conditions were: time 150 min, concentration 65 °Brix solution, Value Fruit / Solution 1:4 and temperature 50 °C, which is obtained with a loss of water from 3.15 to 6.65 and a solid gain of 0.87 to 3.42 with an adjusted R^2 of 0.994-0.999. Also, models were established based on first principles, in order to find the parameters that describe diffusive transfer of sucrose in the OD process cubes carambola (*Averrhoa carambola* L.).

The proposed model predicts the equilibrium points according to time and moisture loss PH_{∞} and solid gain GS_{∞} at steady state have a coefficient of determination $R^2 = 0.999$. Diffusivity values of water loss S_1 with values from 0.004 to 0.17 for interactions at different concentrations of the solution and from 0.17 to 0.02 for the interactions of the ratio of F: S and finally to a temperature of 0.003, the coefficients diffusivity of S_2 solid gain values were -0.02 constants for interactions at different concentrations of the solution and 1.59 to 2.20 for the interactions of the ratio of fruit: saturated solution and finally temperature 1.27 to 1.58. R^2 values showed a variability of 0.84 to 0.99 demonstrating the fit of the experimental data.

SIMBOLOGIA

DO	=	Deshidratación Osmótica
FC	=	Fruto de la Carambola
FAO	=	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
PH_t	=	Pérdida de humedad en cualquier momento (fracción)
PH_∞	=	Pérdida de humedad en el equilibrio (fracción)
t	=	Tiempo de ósmosis (min)
S_1	=	Constante relacionada con la difusión del agua del producto (min^{-1})
S_2	=	Constante relacionada con la difusión de sólidos en el producto (min^{-1})
GS_t	=	Ganancia de sólidos en cualquier momento (fracción)
GS_∞	=	Ganancia de sólidos en el equilibrio (fracción)
M_t	=	Masa final de la muestra después del tratamiento osmótico
M_0	=	Humedad presente inicialmente (g)
M_h	=	Humedad presente en cualquier momento (g)
W_i	=	Peso de materia seca de la muestra antes de la ósmosis (g)
W_f	=	Peso de materia seca de la muestra después de la ósmosis (g)
GSBS	=	Ganancia de sólidos en base seca (fracción)
X_t	=	Fracción másica del sólido (gramos de sólido/gramos muestra) al finalizar el proceso
X_0	=	Fracción másica de sólidos al iniciar el proceso.
P/P	=	Peso/Peso
P/V	=	Peso/Volumen
$W_{z,t}$	=	Fracción adimensional de la masa de sólidos solubles.

J_s	=	Flujo de sacarosa en la interfaz, kmol/m ² s
D_e	=	Difusividad efectiva m ² /s
W_∞	=	Fracción de masa total en la interfaz
W_0	=	Fracción de masa Inicial del soluto en el tejido.
z_p	=	Profundidad de penetración del frente de soluto en el tejido, m
Sc	=	Longitud del capilar desde el frente de penetración a la interfaz, m
Sh	=	Número de Sherwood
Re	=	Número de Reynolds
c_i	=	Concentración molar total de la solución osmótica en la interfaz, kmol/m ³
c_{sf}	=	Concentración molar del soluto en el espacio extracelular, kmol/m ³
c_{si}	=	Concentración molar del soluto en la interface, kmol/m ³
u	=	Velocidad del liquido que pasa el espacio extracelular, m/s
s	=	Medida de la distancia a lo largo de la ruta del capilar, m
$Y_{d,t}$	=	Concentración adimensional de sólidos solubles en el tejido.
z	=	Dirección perpendicular a la superficie, m
z_p	=	Profundidad de penetración del frente de soluto en el tejido, m
J_w^{cell}	=	Flujo de agua a través de membrana celular, kmol/m ² s
L_p	=	Coeficiente de permeabilidad de la membrana celular, kmol ² /j.m ² s
$\Delta\mu_w$	=	Diferencia del potencial químico del agua, j/kmol
a_w	=	Actividad del agua. El subíndice <i>c</i> se refiere a la celda, el subíndice <i>f</i> al espacio extracelular
ΔP	=	Diferencia de presión, Pa
x_c	=	Fracción molar de soluto en el espacio celular.
ξ	=	Coeficiente de elasticidad del tejido, P

β_0	=	Módulo elástico en plasmólisis, Pa
β_1	=	Constante de proporcionalidad para el módulo de elasticidad
V_f	=	Volumen del espacio extracelular alrededor de la célula, m ³
V_c	=	Volumen de la célula, m ³

I. INTRODUCCION

La carambola (*Averrhoa carambola L.*), es un fruto exótico, oriundo de zonas tropicales de países asiáticos; planta adaptada y explotada en la última década en la Región Amazónica del Continente Americano, esta fruta tiene gran aceptación por sus características sensoriales, energéticas, nutricionales y apariencia por su forma de estrella al ser cortada transversalmente, conociéndola como "Starfruit" en los mercados internacionales (Pinzon M. I. *et al.*, 2005).

Para la conservación de frutas; en la actualidad se tiende a utilizar técnicas de procesamiento no deteriorativas, técnicas de obstáculos, barreras o tecnologías invisibles que mantengan las características sensoriales y fisicoquímicas similares a las del fruto fresco; entre ellas la DO, la misma que a diferencia de la deshidratación convencional permite remover parte de la humedad del alimento conservando sus características nutricionales y la vez favorecer la incorporación de ingredientes específicos.

En la deshidratación de alimentos, es muy importante mantener sus propiedades originales evitando que estas sean desnaturalizadas; al extraer el agua libre y parte del agua ligada. Bolin *et al* (1983), manifiesta que la remoción de agua se realiza con el fin de disminuir la actividad de agua, inhibir el desarrollo microbiano y las reacciones de deterioro, una de las formas más eficientes para remover agua de los alimentos es a través de la osmosis, ya que este no tiene que sufrir cambio de estado.

Por otro lado Torreggiani, 1993 y Fito, 1994; citados por Corzo y Centeno, (2003), sostienen que la DO es una técnica de concentración de sólidos (o remoción de agua) que consiste en sumergir frutas o verduras, trozadas o enteras, en una solución saturada compuesta por azúcar, sal, maltodextrinas u otros solutos capaces de generar una alta presión osmótica. A diferencia de otras técnicas como el curado de la carne y la salazón de queso, la DO se basa en una remoción significativa de agua frente a una menor entrada de solutos al alimento por difusión, es así como durante este proceso se originan dos flujos principales y un tercero poco apreciable: una importante salida de agua desde el producto hacia la solución, una entrada del soluto desde la solución hacia el alimento y, una mínima pérdida de solutos propios del alimento (azúcares, sales minerales, ácidos orgánicos, otros) que aunque cuantitativamente es insignificante, puede tener alguna importancia a nivel nutricional y sensorial. Se ha notado que estos flujos ocurren a través de una membrana que posee permeabilidad diferencial y regula en cierto grado la entrada y salida de solutos.

En la DO la textura del alimento final es considerablemente mejor ya que las células no colapsan al perder el agua, además, la incorporación de solutos tiene un efecto protector sobre la estructura celular, haciendo al alimento más resistente a tratamientos posteriores, aun mas que se ahorra energía ya que como se dijo anteriormente la deshidratación ocurre por una osmosis y no a través de un cambio de fase del agua. Al aplicar temperaturas moderadas durante el proceso, el daño que se produce sobre el sabor y el color es mínimo y hay una mayor retención de compuestos volátiles. Además, se inhibe el pardeamiento enzimático lo que evita el uso de sulfitos.

Ensayos realizados por Schwartz (1993) citado por Tepper (1996), en durazno, manzana, banana, peras asiáticas, etc arrojan productos de buena aptitud para su posterior deshidratado, congelado, enlatado o transformación en pulpa. Es importante destacar que una DO no genera productos estables en el tiempo, por lo que preferentemente se debe usar como un pre-tratamiento de otros procesos como secado, congelado, pasteurizado, enlatado y otros.

En los últimos diez años se han llevado a cabo numerosos estudios sobre transferencia de masa osmóticamente inducida con aplicaciones a escala de planta piloto, pero no se tiene una comprensión total ni un modelado matemático desarrollado adecuadamente, de los mecanismos involucrados en la interacción simultánea. La aplicación industrial del proceso se enfrenta a problemas de ingeniería relacionados con el movimiento de grandes volúmenes de soluciones de azúcar concentrada y equipo para las operaciones continuas. El uso de soluciones de azúcar concentrada crea dos problemas importantes: la viscosidad del jarabe que es tan grande que la agitación es necesaria para disminuir la resistencia a la transferencia de masa en el lado de solución y la diferencia de densidades (solución osmótica y la fruta), hace que el producto flote.

Todavía queda por resolver los problemas tecnológicos que afectan a la aplicación del proceso a escala industrial. El contacto de fases sólido (producto) y la fase líquida (solución concentrada) es una limitación importante del desarrollo industrial del proceso debido a la densidad, viscosidad y la fragilidad de las piezas del producto alimenticio hace difícil la optimización del proceso que tiene dos componentes principales: el reciclaje de jarabe y la reducción de los volúmenes de jarabe.

Los modelos matemáticos del proceso de transferencia de sacarosa durante la DO del fruto de la carambola (*Averrhoa carambola* L.), permiten establecer bases para el diseño y escalamiento de equipos así como dotar de un paquete tecnológico para el aprovechamiento potencial de las frutas tropicales.

II. MARCO TEORICO

2.1 ANTECEDENTES GENERALES DE LA CARAMBOLA

2.1.1 Origen e Historia

La carambola, es originaria de Asia tropical, específicamente de la India o Indonesia. Fue introducida al Brasil en 1817 por Paul Germain en Pernambuco y en el Perú vía la Amazonía, por viajeros que hacían ruta por el Brasil, extendiéndose después a los departamentos de Huánuco, Madre de Dios y el Cusco. En el Perú, esta fruta se desarrolla en zonas subtropicales, en lugares como Chanchamayo y Satipo (Junín), Tingo María (Huánuco) e Iquitos, en los Centros de Productos Agropecuarios (Calzada B.J, 1980).

2.1.2 Características Botánicas de la Carambola (*Averrhoa carambola* L.)

Es un arbusto perennifolio, perteneciente a la familia de las oxalidaceaceas, muy decorativo, posee una altura mediana entre 5 y 9 m, con ramas colgantes, hojas grandes, alternas, compuestas, de 5 a 11 folíolos ovado-elípticos de 10 x 4 cm, glaucos por el envés. Sus flores son pequeñas de unos 4 mm de diámetro, moradas o rojas, dispuestas en racimos axilares o terminales; la producción de los frutos se inicia a los tres años de edad, se considera un cultivo tropical y subtropical, que crece de 0 a 1200 msnm y preferentemente con lluvias durante todo el año (1800 mm o un poco más). Los frutos se dividen en variedades de frutos dulces y variedades de frutos agrios (FAO; 2006).

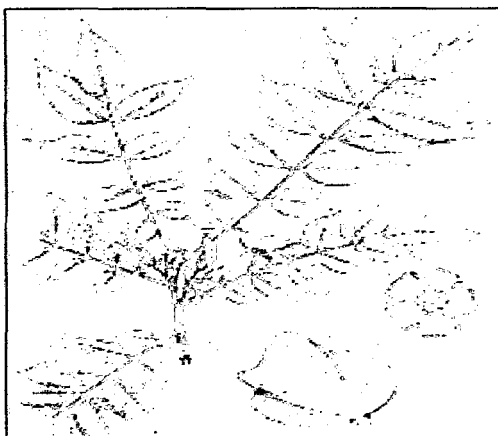


Figura 2.1. Carambola (*variedad ácida*) fruto, hojas y flores.
Fuente: TROPILAB INC (2008)

2.1.2.1 Taxonomía y morfología de la carambola (*Averrhoa carambola* L.).

Brack A. E (2001); determinó la siguiente clasificación sistemática para la carambola:

DIVISIÓN	:	Fanerógamas
SUBDIVISIÓN	:	Angiosperma
CLASE	:	Dicotiledónea
ORDEN	:	Oxalidacea
FAMILIA	:	Oxalidaceae
GENERO	:	Averrhoa
ESPECIE	:	carambola
NOMBRE COMÚN	:	Carambola.

2.1.2.2 Histología del fruto de la carambola (*Averrhoa carambola* L.)

El fruto de la carambola (*Averrhoa carambola* L.), es de color amarillo cerezo cuando está maduro, de 5 a 12.5 cm de largo y de 3 a 6 cm. de diámetro, el jugo de la pulpa es ácida, con semillas colgantes cerca de la base. Las semillas están parcialmente encerradas en un arilo húmedo y son ovoides muy comprimidos de 0.7 a 1.2 cm. de largo. La testa es de color café claro, brillante y delgada (Calzada B. J, 1980).

Los frutos son marcadamente penta-angulados, en corte transversal tiene forma de estrella, son quebradizos, jugosos, aromáticos de sabor ácido, contienen azúcares reductores y es fuente de vitamina A y C (Kennard y Winters, 1963).

En las figuras 2.2 y 2.3 se observan la estructura del tejido de la carambola (*Averrhoa carambola* L.).

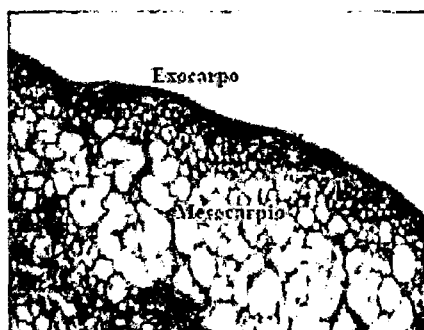


Figura 2.2. Corte transversal del fruto de carambola (*Averrhoa carambola* L.).



Figura 2.3. Mesocarpo de la baya de carambola (*Averrhoa carambola* L.).

2.1.3 Características nutricionales de la carambola (*Averrhoa carambola* L.)

Su componente mayoritario es agua, así mismo contiene pequeñas cantidades de hidratos de carbono simples, su valor calórico es muy bajo. La pulpa es rica en oxalato de calcio y fibra soluble. Contiene una cantidad moderada de provitamina A y de vitamina C. En cuanto a minerales, destaca su contenido en potasio.

La provitamina A o β -caroteno se transforma en vitamina A en nuestro organismo conforme éste lo requiera. Dicha vitamina es esencial para la visión, el buen estado de la piel, el cabello, las mucosas, los huesos y estimula el buen funcionamiento del sistema inmunológico. La vitamina C interviene en la formación de colágeno, huesos y dientes, glóbulos rojos y favorece la absorción del hierro de los alimentos y la resistencia a las infecciones. El potasio es necesario para la transmisión y generación del impulso nervioso y para la actividad muscular normal (Taste Perú 2002).

2.1.4 Variedades de carambola (*Averrhoa carambola* L.)

Existen dos tipos principales de carambolas, dulces y ácidas. Los tipos dulces se recomiendan para ser consumidos frescos mientras que ambos tipos son útiles para procesarlas y en recetas caseras. Algunas variedades, tales como "Golden Star" adquieren un sabor dulce si se permiten madurar en el árbol (Crane J. H, 2009).

Hay 2 tipos distintos de carambola, la más pequeña, de tipo muy ácido, rica de sabor, con más ácido oxálico, y las de tipo más grandes, llamadas dulces, de sabor más suave, más blandas con menos ácido oxálico. En 1935, se plantaron semillas de carambola en Hawai por la University of Florida's Agricultural Research and Education Center, en Homestead. Una selección de las plantas de semillero resultantes, se multiplicó vegetativamente durante los años 1940 y 1950 y, a finales de 1965, fue lanzada oficialmente bajo el nombre de Golden Star y se distribuyó a los productores. El fruto es grande, muy alado, decorativo, y ligeramente sub-ácido a dulce. Además, esta variedad muestra menos deficiencias de elementos menores en los suelos alcalinos, e incluso árboles aislados producen bien y regularmente sin polinización cruzada. Varios cultivares de Taiwán están siendo cultivados en el United States Department of Agriculture's Subtropical Horticulture Research Unit en Miami, incluyendo Mih Tao, introducido en 1963, también Dah Pon y Tean Ma y otros identificados sólo por números, y Fwang Tung traídos de Tailandia por el Dr. R J. Knight en 1973. Hay ciertas líneas de carambola, como Newcomb, Thayer y Arkin que se cultivan comercialmente en el sur de Florida. Algunos cultivares y plantas tienen flores con los pedicelos cortos, otros sólo flores con pedicelos largos, este factor afecta tanto la auto-polinización como la polinización cruzada.

Cuadro 2.1: Variedades de carambola introducidas o seleccionadas en Florida

VARIEDAD	ORIGEN ¹	SABOR	RECOMENDADA ² H C	COMENTARIOS
Arkin	Florida	dulce	S S	comercialmente importante
B-2	Malasia	dulce	N ND	sometida a evaluación
B-10	Malasia	dulce	S ND	sometida a evaluación
B-16	Malasia	dulce	S ND	sometida a evaluación
B-17	Malasia	dulce	S ND	sometida a evaluación
Dah Pon	Taiwan	dulce	N N	color verdoso, insípida
Demark	Indonesia	dulce	N N	sabor amargo
Fwang Tung	Thailand	dulce	S N	color verdoso, costillas finas, buen sabor, grande
Golden Star	Florida	ácido	S Q	dulce cuando está bien madura, muy productiva
Hew-1	Malasia	dulce	S N	puntos blancos, buen sabor
Kary	Hawaii	dulce	S ND	sometida a evaluación
Maha	Malasia	dulce	N N	color verdoso, costillas finas, insípido
Mih Tao	Taiwan	dulce	N N	insípido
Newcomb	Florida	ácido	S N	ácido
Sri Kembangan	Malasia	dulce	ND ND	sometida a evaluación
Star King	Florida	ácido	N N	muy ácido
Teau Ma	Taiwan	dulce	N N	insípido
Thayer	Florida	ácido	S N	ácido
(1) Variedades cultivadas en Florida y que se originaron de semillas introducidas de otros países (por ejemplo: Tailandia, Malasia) o Hawaii (por ejemplo: Golden Star).				
(2) Uso recomendado; H = hogar, C = comercial; S = si, N = no, Q = quizás, ND = no existe recomendación disponible.				

Fuente: Crane J. H. - IFAS (2009)

2.1.5 Composición fisicoquímica de la carambola (*Averrhoa carambola* L.)

En el cuadro 2.2, se muestra la caracterización de fisicoquímica de la carambola de manera general, mientras que en el cuadro 2.3 se muestra la composición química proximal de la carambola (*Averrhoa carambola* L.).

Cuadro 2.2: Caracterización Fisicoquímica

CONTENIDO	LIMITES
Ácido Oxálico (g/100g de jugo)	0.04 – 0.70
Acidez (mq/100g De jugo)	1.90 – 13.10
PH	2.40 – 2.50
Grados Brix	5.00 – 13.00
Azúcares totales (%)	3.50 – 11.09
Contenido de jugo (%)	60.00 – 75.00

Fuente: Novillo M. G (2009)

Cuadro 2.3: Composición Química Proximal del fruto de la carambola
(*Averrhoa carambola* L.)

COMPONENTES	UNIDAD	CARAMBOLA
Calorías	Cal.	36.0
Agua	g	90.0
Proteína	g	0.5
Grasa	g	0.3
Carbohidratos	g	9.0
Fibra	g	0.6
Ceniza	g	0.4
A	mg	90.0
B1	mg	0.04
B2	mg	0.02
B6	mg	0.30
C	mg	35.0
Ca	mg	5.0
P	mg	18.0
Fe	mg	0.40

Fuente: Calzada B. J., (1980)

2.1.6 Producción de la carambola (*Averrhoa carambola* L.)

En el cuadro 2.4 se muestra la producción de los mayores productores de carambola (*Averrhoa carambola* L.) a nivel del Perú entre los años 1995 al 1999.

La situación actual del fruto de la carambola es deprimente, las pocas hectáreas de este cultivo en zonas de selva (Alto Huallaga, Bajo y Alto Mayo, Chanchamayo, Ucayali, etc), no tiene un manejo y están descuidados; esto se ve reflejado en la cosecha y postcosecha, donde se pierden en grandes cantidades, pudriéndose debajo de sus árboles ya que el agricultor prefiere dejarlo así antes de sacarlo al mercado dado su bajo costo, (Portal Agrario, 2010).

Los frutos de la carambola (*Averrhoa carambola* L.) en el Perú se desarrollan en zonas subtropicales, en lugares como: Chanchamayo, Satipo, del departamento de Junín; Tingo María y en Iquitos en los centros de Productos agropecuarios (Calzada B. J, 1980).

Cuadro 2.4: Producción, Superficie y Rendimiento de la Carambola (*Averrhoa carambola* L.) en el Perú

AÑO	PRODUCCIÓN (TM)	SUPERFICIE (Ha)	RENDIMIENTO (Kg)
1995	2204	38	58000
1996	1324	63	21016
1997	1071	65	16477
1998	1447	92	15728
1999	1461	92	15880

Fuente: Direcciones Regionales de Agricultura (1995-1999)

Elaboración: MINAG – OIA.

Cuadro 2.5: Producción, Superficie Cosechada y Rendimiento de Carambola (*Averrhoa carambola* L.) según Departamento

AÑO	DEPARTAMENTO	PRODUCCIÓN (TM)	SUPERFICIE (Ha)	RENDIMIENTO (Kg/Ha)
1995	Loreto	2204	38	58000
1996	Loreto	950	38	25000
	Junín	374	25	14960
1997	Huánuco	105	8	13125
	Junín	402	27	14889
	Loreto	525	26	20192
	Madre de Dios	39	4	9750
1998	Madre de Dios	38	4	9500
	Huánuco	279	21	13286
	Junín	625	42	14881
	Loreto	505	25	20200
1999	Madre de Dios	15	2	7500
	Huánuco	273	21	13000
	Junín	622	42	14810
	Loreto	551	27	20407
F				

Fuente: Direcciones Regionales de Agricultura (1995-1999)

Elaboración: MINAG – OIA.

2.1.7 Aprovechamiento y conservación de la carambola (*Averrhoa carambola* L.)

En la región amazónica, la carambola (*Averrhoa carambola* L.) es comercializada principalmente como fruto fresco. No obstante, el fruto presenta potencial para ser utilizado agroindustrialmente en la elaboración de pulpas, mermeladas, néctares y productos osmodeshidratados.

2.2 SOLUCIÓN OSMOTICA

2.2.1 Generalidades

Barbosa y Vega, (2000); menciona que la elección del soluto o solutos de la solución osmótica están basados en tres factores de importancia siendo estos: Las características sensoriales del producto; el costo del soluto y la masa molecular del mismo.

Generalmente los solutos mas usados en los procesos de DO son el cloruro de sodio, la sacarosa, la lactosa, jarabe de maíz con alto contenido en fructosa y glicerol. El etanol, alanina, L-Lisina, glutamato monosódico, lactato sódico, glicol, caseína, suero de albúmina, proteína de soja y glicerina se presentan en la bibliografía como depresores de actividad de agua (Lerici *et al*, 1985; Chirife y Favetto, 1992 citados en Barbosa y Vega, 2000).

Cuadro 2.6. Usos y Ventajas de Agentes Osmóticos

NOMBRE	USOS	VENTAJAS
Cloruro de sodio	Carnes y vegetales. Soluciones superiores al 10%	Alta capacidad de depresión Aw
Sacarosa	Principalmente en frutas	Reduce el pardeamiento y aumenta la retención de volátiles
Lactosa	Principalmente en frutas	Sustitución parcial por sacarosa
Glicerol	Frutas y vegetales	Mejora la Textura
Combinación	Frutas, vegetales y carnes	Mejora las características sensoriales, combina la gran capacidad de depresión de Aw de las sales, con alta capacidad de eliminación de agua del azúcar.

Fuente: Barbosa-Cánovas, et. al., 1996

El cuadro 2.6 muestra los usos y ventajas de los agentes osmóticos más conocidos para el proceso de DO de ello se desprenden que la sacarosa y la dextrosa son las más indicadas para productos alimenticios.

2.2.2 Sacarosa

La sacarosa es un disacárido compuesto por una molécula de glucosa (dextrosa) y fructosa (levulosa), que al calentarla en un medio ácido o por acción de la enzima invertasa, se descompone para formar (+) D-glucosa y (-) D-fructosa, mezcla que se denomina “azúcar invertido”, y el proceso, “inversión” o “hidrólisis”; se obtiene a partir de la caña de azúcar o de la remolacha azucarera; es estable al aire, pero en forma de polvo absorbe la humedad del aire. Es fermentable, pero a altas concentraciones (>17%), resiste la descomposición bacteriana. Se utiliza como endulzante, preservante, antioxidante, excipiente y agente granulador y tensoactivo en jabones, productos de belleza y tintas (Aguilar N, 2006). La sacarosa es uno de los mejores agentes osmóticos. Es un inhibidor eficaz de la polifenoloxidasas, evita la pérdida de sabores volátiles y la mayoría de las membranas celulares son impermeables a ella; su difusividad es mucho mas bajo que la del agua, lo que resulta en una baja captación de sólidos en el tejido (Sharma S. *et al*, 2003).

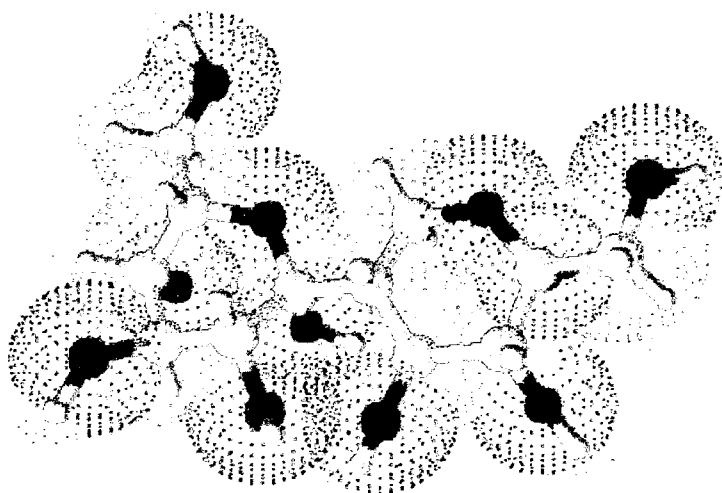


Figura 2.4. Molécula de Sacarosa (β -D-fructofuranosil-
 α -D-glucopiranosida)

2.2.3 Propiedades físicas de la solución osmótica

En el cuadro 2.7 se puede observar las propiedades y los valores de densidad, viscosidad, entalpía, calor específico y de la actividad de agua de soluciones de jarabe de sacarosa a diferentes temperaturas y a diferentes concentraciones, y con un grado de pureza del azúcar del 99.5%.

Cuadro 2.7. Propiedades Físicas y Valores del Azúcar a Diferentes

Temperaturas y Concentraciones

Temperatura °C	Concentración °Brix	Densidad Kg/m³	Viscosidad mPa.s	Entalpía KJ/Kg	Calor específico KJ/Kg°K
18	56.6	1264.3	36.705	50.7	2.85
18	60	1287.8	67.48	48.9	2.76
18	65	1317.8	171.849	46.7	2.74
18	70	1348.7	573.432	44.5	2.52
18	73.4	1367.8	1417.997	43.2	2.45
25	56.6	1261.1	25.151	79.8	2.88
25	60	1284.3	44.248	68.4	2.79
25	65	1314.2	105.054	65.3	2.67
25	70	1345.1	318.948	62.3	2.56
25	73.4	1364.1	732.757	60.5	2.49
35	56.6	1256.1	15.763	99.5	2.93
35	60	1279.1	26.266	96.5	2.84
35	65	1308.9	57.184	92.3	2.72
35	70	1339.7	154.482	88.1	2.61
35	73.4	1358.6	324.063	85.6	2.54
45	56.6	1250.7	10.582	129.3	2.97
45	60	1273.6	16.835	125.1	2.88
45	65	1303.3	34.039	119.8	2.77
45	70	1334.0	83.241	114.5	2.66
45	73.4	1352.9	161.587	111.3	2.6
52	56.6	1246.7	8.276	150.2	3
52	60	1269.6	12.795	145.3	2.91
52	65	1299.2	24.718	139.3	2.81
52	70	1329.9	56.846	133.3	2.7
52	73.4	1348.8	105.196	129.7	2.64

Fuente: SUGARTECH, (2005).

2.3.1 Factores que Influyen en la Velocidad de Deshidratación

Los factores más influyentes en la velocidad de DO son:

- Con respecto a la fruta:
 - a. Reducción del tamaño o peso de la fruta sumergida en la solución osmótica o jarabe concentrado, es decir cantidad de superficie que se pone en contacto con el jarabe o solución osmótica.
 - b. Permeabilidad y características estructurales de las paredes o membranas celulares.
- Con respecto a la solución osmótica:
 - a. Naturaleza de la solución osmótica (glucosa, fructosa, sacarosa, etc)
 - b. Concentración
 - c. Relación Fruta :Jarabe (P/P o P/V)
- Con respecto al proceso de DO
 - a. Preparación de la materia prima (por ejemplo: pelado, cortado, etc)
 - b. Temperatura
 - c. Tiempo
 - d. Grado de agitación.

2.4 MODELAMIENTO MATEMATICO EN LA DESHIDRATACION OSMOTICA

Generalmente se consideran tres aspectos, que describen la DO las cuales son: la cinética de la pérdida de agua y ganancia de sólidos, condiciones de equilibrio y atributos de calidad.

En la presente revisión se explora la cinética de la pérdida de agua y ganancia de sólidos incluyendo algunos desarrollos sobre las condiciones de equilibrio.

2.4.1 Descripción General de la Deshidratación Osmótica

La deshidratación osmótica es una operación solido-liquido de contacto. La matriz solida de la fruta antes de ser sumergida en la solución osmótica es pelada y cortada con la finalidad de evitar la resistencia a la transferencia del soluto en la pared externa de la muestra, recomendándose reducir convenientemente el tamaño de la fruta.

Las muestras pueden ser sumergidas en un recipiente agitado conteniendo la solución osmótica o esta puede vertirse continuamente sobre el lecho de las muestras de frutas, en cualquier caso la solución tiene que moverse através de la superficie de las muestras para que proporcione una gradiente de concentración y consecuentemente se logre una DO eficiente. Durante el proceso los trozos de fruta pierden agua y ganan solutos de la solución osmótica.

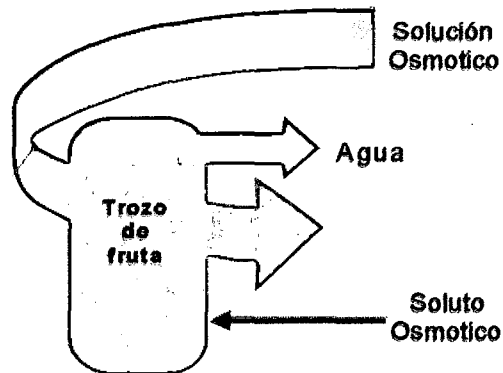


Figura 2.6. Tratamiento de Deshidratación Osmótica de un trozo de fruta

Simultáneamente la solución se va diluyendo principalmente por la pérdida de solutos. Muchos trabajos se han enfocado en que la operación unitaria de DO tiene mayor aplicación industrial pero hasta la fecha los procedimientos de diseño son todavía muy empíricos. Una de las principales razones de esto es la falta de un desarrollo ingenieril de los fenómenos de transferencia en el área es por ejemplo, que se ha publicado muy poco respecto a las operaciones continuas en las que cambia la concentración de la solución osmótica. El equipamiento específico utilizado para llevar a cabo la deshidratación puede parecerse a un contactor común sólido-líquido, pero su diseño debe tener en cuenta que los tejidos vegetales se dañan con facilidad y que flotan en las soluciones.

Pavasovic *et al.* (1986) utilizó un contactor vertical en el cual los cargaba los cubos de fruta por los fondos. Qi, (1989), desarrollo un trabajo colocando las zanahorias sobre una cinta en movimiento, en contacto por aspersion con una solución que recircula. En ambos casos, el diseño se basó en un escalamiento empírico de una unidad discontinua en de lugar procedimientos de cálculos basados en modelos fundamentales; como se ha mencionado anteriormente.

La compleja estructura celular de la matriz sólida, en alguna medida dificulta el uso de los métodos tradicionales de diseño de operación sólido-líquido (Geankoplis, 2000, Treybal, 2003). Por esta razón el modelamiento de la operación de DO ha sido conducido empleando modelos semiempíricos. Sin embargo, se han desarrollado importantes avances de modelos basados en los tejidos y/o medios porosos.

2.4.2 Modelos para la Deshidratación Osmótica

Cada etapa de las operaciones de contacto sólido-líquido requiere un tratamiento propio, de acuerdo a los principios básicos de ingeniería de transferencia de masa. Se han estudiado extensivamente la transferencia de masa en la fase líquida.

Sin embargo, los modelos para la DO desarrollados hasta la fecha suponen que la concentración en la interfaz es constante e igual a la concentración de la solución osmótica global. En consecuencia, estos modelos se han enfocado en la transferencia de masa controlada por difusión en la fase sólida.

Los modelos que asumen la difusión independiente para el agua y el soluto osmótico en la fase sólida, supone que el sólido es isotrópico y no se encoge. Usando estas suposiciones, los modelos aplican la ecuación diferencial fundamental para la difusión en sólidos (primera ley de Fick), la ecuación (2.1) (Crank, 1975). El flux del componente s , J_s en $\text{kmol/m}^2\text{s}$ es proporcional a la difusividad binaria D en m^2/s y el gradiente de concentración, ∇c en $\text{kmol/m}^3\text{m}$

$$J_s = -D\nabla c \quad (2.1)$$

La solución a la ecuación (2.1) para cada caso en particular depende de la geometría y de las suposiciones con respecto a las condiciones iniciales y de contorno. Entre las condiciones de contorno comúnmente usados es la concentración constante de la interfaz, asumiendo que la concentración de la solución osmótica es igual a la solución en conjunto, esta suposición se deriva de las condiciones particulares de la solución de razones fruta: solución mayor de 1:10 y la consideración genérica de sistemas completamente agitados.

Un ejemplo de las soluciones matemáticas para la ecuación (2.1) es la ecuación (2.2) para una lámina semi infinita. La difusividad efectiva D_e , se combina en una serie de Fourier con el espesor medio de la lámina h_t y la distancia z desde la interfaz. Se obtiene la fracción de masa adimensional para los sólidos solubles $W_{z,t}$, a una profundidad determinada z y el tiempo t .

Las condiciones constantes de frontera son la fracción de masa en la interfase, W_∞ y la condición de ausencia de flujo a través del plano medio. La condición inicial es la fracción de masa uniforme en el tejido, W_0 , (Crank, 1975).

$$\frac{W_{z,t}-W_\infty}{W_0-W_\infty} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp\left(\frac{-D_e t (2n+1)^2 \pi^2}{4h_t^2}\right) \cos\left((2n+1)\pi \frac{h_t-z}{2h_t}\right) \quad (2.2)$$

Puesto que esta ecuación proporciona una forma para el perfil de concentración de la solución osmótica en el sólido, la integral del perfil z se utiliza para calcular los sólidos ganados o la pérdida de agua. Ajustando los datos experimentales a modelos tradicionales dan herramientas fiables de cálculo para estimar las difusividades efectivas (Crank, 1975). Estos valores de difusividad efectiva son luego empíricamente correlacionadas con la temperatura y la concentración de la solución osmótica.

Barat (1998) incluye una revisión de estos modelos semiempíricos publicados en la literatura. Un diagrama simplificado de la concentración en las fases líquida y sólida asumidas por estos modelos se presenta en la figura 2.7 (a) en unidades arbitrarias.

El perfil integrado ofrece un valor medio de concentración de los sólidos en el tejido como se muestra en la Figura 2.7 (b).

Las soluciones de las ecuaciones diferenciales de la difusión de la ley de Fick en sólidos (Crank, 1975) fueron utilizados por Benstain et al. 1990.

Enfoques simplificados semi-empíricos derivados de las mismas soluciones de la primera ley de Fick han demostrado ser útiles para describir la pérdida de agua y ganancia de sólidos. Algunos ejemplos relevantes son aquellas que dependen de la raíz cuadrada del tiempo (Magee *et al.* 1983); en un comportamiento hiperbólico asintótico en el tiempo (Azuara *et al.* 1992), o en una aproximación logarítmica (Lenart, 1992). Barat *et al.*, (1996) utilizó las relaciones semi-empíricas entre variables.

Hough *et al.* (1993) utilizó un método de solución diferente. La integración numérica de las ecuaciones diferenciales para la difusión utilizando un algoritmo de Crank-Nicholson proporciona el perfil y la concentración total en el sólido.

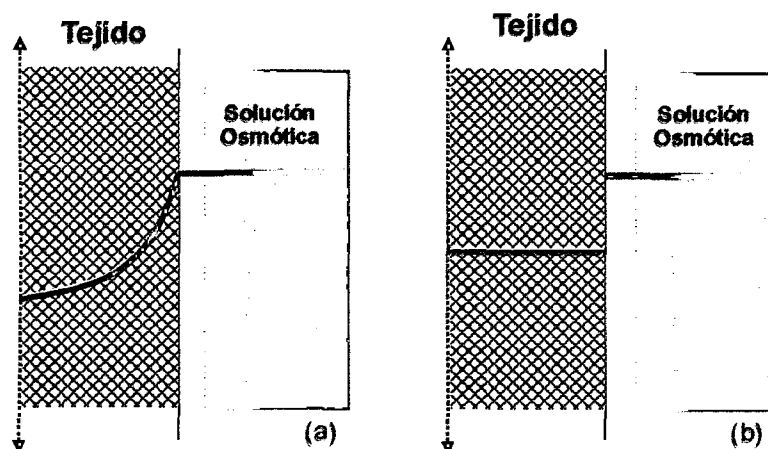


Figura 2.7. Modelos de Concentración de solutos que involucran al tejido de la fruta

Muchas publicaciones han reportado que el soluto osmótico que penetra el tejido por lo general se encuentra sobre todo en una capa superficial, incluso después de períodos prolongados de exposición a la solución (Raoult-Wack *et al.*, 1991, Lazarides, 1994, Salvatori, 1997). Otro tipo de modelos se obtienen a partir de este concepto. El tejido se divide en una zona superficial o activa, y una zona interior o fresca, tal como se muestra en la figura 2.8 (a). El modelo bi-compartimental propuesto por Raoult-Wack *et al.* (1991) asumió las concentraciones promedio en ambas zonas (figura 2.8 (b)), y describió su variación en el tiempo la combinación de dos ecuaciones exponenciales.

Salvatori (1997) ha estudiado ampliamente esta zona y menciona que esta se hace más profunda con el tiempo; por lo tanto, se crea de un conjunto variable de condiciones para la transferencia de masa, tanto en el espacio y el tiempo. Esta zona se caracteriza por la profundidad de penetración del soluto desde la interfaz z_p . Se ha establecido que la profundidad de penetración del soluto osmótico es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo.

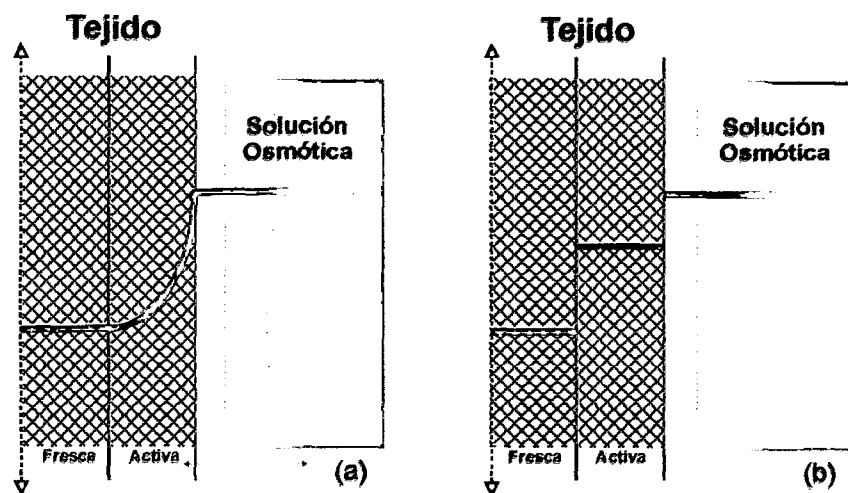


Figura 2.8. Modelos de la Concentración de la solución (solutos) que dividen el tejido de la fruta

El esfuerzo para incluir características complejas de los tejidos celulares en el modelamiento de la DO ha conllevado al desarrollo de modelos a partir de un enfoque celular. Como se muestra en la Figura 2.2, los tejidos parenquimático que constituyen la mayoría de frutas y hortalizas, están constituidos por una matriz de células, atadas y delimitadas por una malla tridimensional de paredes celulares, constituidas de fibras celulósicas. Una membrana semipermeable llamada plasmalema encierra cada célula.

La mayor parte del agua y sólidos solubles de la célula se encuentran en una o más vacuolas de gran tamaño. Las vacuolas contienen a menudo de 80-90% del volumen celular (Nobel. 1983). Una membrana llamada tonoplasto contiene la vacuola. El plasmalema se encajona en la malla de paredes celulares y espacios capilares abiertos.

Durante la DO, los canales capilares son utilizados por el agua para salir del tejido, así como por el soluto para entrar en la muestra, como se ilustra en la figura 2.10. Los capilares constituyen la mayor parte del espacio extracelular en el interior del tejido. La mayoría de las frutas tienen espacios vacíos que oscilan entre el 2 y el 10%. Algunas frutas, como manzanas, tienen hasta un 25% espacio vacío (Salvatori, 1997). Estos espacios pueden ser llenados con agua o solución durante el tratamiento, promoviendo la ruta necesaria para lograr la transferencia de masa en el interior del tejido. Un poco de agua de la superficie va directamente a la solución, pero la mayor parte tiene que ir a través de la red

de capilares y las paredes porosas de la célula. Esta vía principal para el movimiento del agua en el tejido se denomina apoplasto. A medida que el tiempo transcurre, el soluto penetra más en estos espacios extracelulares del tejido, creando la zona donde las células pierden agua a través de sus membranas.

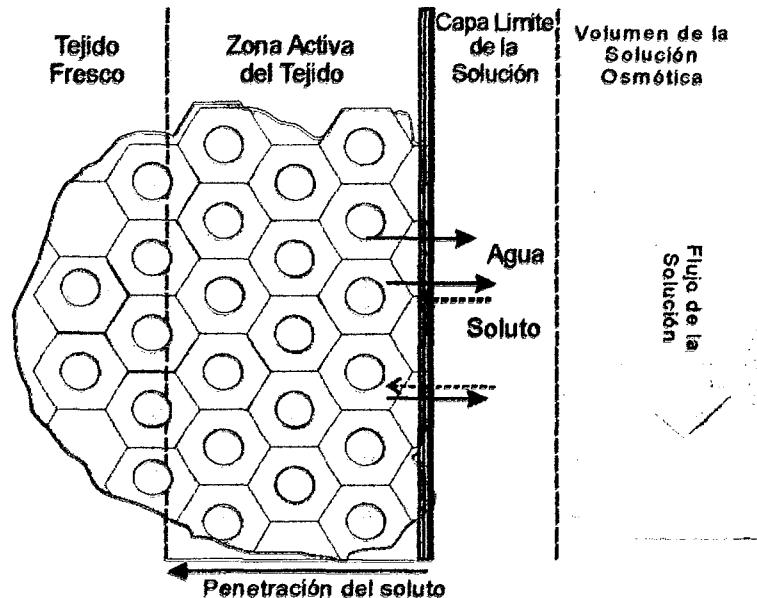


Figura 2.9. Transferencia de masa en el tejido en contacto con una solución osmótica.

En algunos tejidos, no hay otra ruta para la transferencia de masa, que la denominada simplasto. Las células están conectadas a través de canales intercelulares muy pequeños llamados plasmodesmos, y un flujo de savia simplástica puede generarse a partir de las células más profundas hacia la superficie del tejido por las diferencias en la presión celular (Nobel 1983).

Un primer método crea un modelo celular que utiliza una unidad de volumen para representar una célula típica y sus alrededores como bloques de construcción de un tejido. Esto naturalmente conlleva métodos numéricos discretos (Spiazzi y Mascheroni, 1998).

Toupin (1986) propuso un modelo matemático que incorpora las características de la membrana celular junto con otras características estructurales y biofísicas para la descripción de flujos de agua y solutos en tejidos celulares complejos.

Las células fueron consideradas como unidades cilíndricas uniformes orientadas paralelamente a los capilares difusionales. El tejido fue considerado

isotrópico y homogéneo, considerando contracciones a lo largo del eje de los cilindros. Marcotte y Le Maguer (1991), usaron el concepto de equilibrio termodinámico para estimar la distribución del agua en los tejidos de la papa. Marcotte et al. (1991) extendió el modelo de Toupin dando una descripción más detallada de la termodinámica de las fuerzas involucradas en el proceso osmótico. Su modelo fue utilizado para simular el movimiento del agua y de la sacarosa en tubérculos de papa (Marcotte, 1988).

Spiazzi y Mascheroni (1998) desarrollaron un modelo similar para los tejidos de manzana usando volúmenes finitos para representar las células y derivar las difusividades efectivas con datos de la literatura.

El Segundo Método uso propiedades promedios de los tejidos en lugar de ocuparse de arreglos con células simples. La característica fundamental de este método asume es que las propiedades del tejido a una profundidad igual al promedio (Le Maguer y Yao, 1995).

Los Principios de Difusión son aplicados a través de la ley extendida de Fick, incluyendo el flujo global. Como un continuo en el espacio extracelular combinado con la termodinámica irreversible a través de la membrana. El Modelo conceptual propuesto por Yao y Le Maguer, (1996) se muestra en la figura 2.10. El perfil de concentración se muestra en unidades arbitrarias a lo largo del capilar.

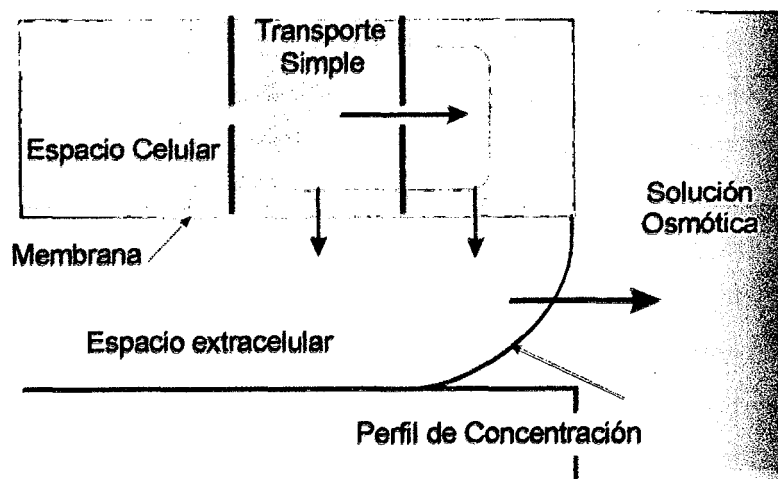


Figura 2.10. Mecanismos simplificados de la transferencia de masa en la Deshidratación Osmótica.

Se considera que los tejidos constan de volúmenes intracelular y extracelular, separados por una membrana semipermeable. Las membranas de las células

individuales en el tejido son combinados en una membrana simple equivalente (Le Maguer y Yao, 1995). El volumen extracelular se considera continuo, lleno de agua y en contacto con la membrana. El volumen extracelular se divide en volumen libre (incluidos los capilares y el vacío dentro de las paredes celulares) y el volumen de las fibras de la pared celular. La relación entre el volumen libre y el volumen total del tejido es la porosidad.

Se considera valores promedio de las propiedades para las células y la porosidad del tejido, se realiza un modelo para mantener las proporciones existentes en el tejido real. Un valor de turgencia, estableció la equivalencia de longitud entre el camino a través del volumen libre extracelular, y la distancia medida desde la superficie de la muestra. Esta representación gráfica de los tejidos permite una formulación más sencilla de las ecuaciones que describen los fenómenos involucrados en la DO.

Un conjunto de ecuaciones diferenciales describen los distintos fenómenos en los tejidos celulares también se han usado métodos de elementos finitos para resolver estas ecuaciones en el espacio y el tiempo. Los cuales concluyen que el flujo osmótico de agua era responsable por el 90% de la pérdida de agua, y que el soluto se difundiría un 60% menos en el tejido en comparación con un mecanismo de difusión puro. El avance del frente de penetración se relaciona con la contracción del tejido.

2.4.3 Fenómenos de Transferencia de Masa en la Deshidratación Osmótica

Como se menciono anteriormente, la difusión de los solutos osmóticos no son independientes del movimiento del agua, simplemente porque el soluto se difunde a través de este. Además, la matriz sólida es un compuesto de varias fases: los sólidos insolubles que constituyen elementos más estructurales y funcionales del tejido, la solución celular, la solución extracelular y el aire extracelular.

Desde un punto de vista de la transferencia de masa se pueden establecer cuatro volúmenes generales de control.

En primer lugar la mayor parte de la solución osmótica, que corre paralela a la superficie de la muestra, continuando una capa límite entre la interfaz con el tejido y la solución global (Ver Figura 2.9). En estas dos zonas sólo existe una fase líquida. Las otras dos zonas son aquellas mencionadas anteriormente.

A. Transferencia de Masa en la Capa Límite de la Solución

Los flujos a través de la capa límite son calculados usando un coeficiente de transferencia de masa y una diferencia en concentraciones. Las ecuaciones para estimar el coeficiente de transferencia son a menudo una función de los números de Reynolds Re , y Schmidt Sc que se describen en las ecuaciones (2.3) y (2.4) (Treybal. 2003). Estos números adimensionales están definidos en función de:

- La densidad de la solución, ρ_l en kg/m^3 .
- La viscosidad de la solución, μ en Pa.s .
- La difusividad binaria D en m^2/s .
- Una longitud característica L en m , y
- La velocidad superficial, u_{sup} m/s

La velocidad y las propiedades locales de la solución puede ser difícil de estimar para algunos parámetros experimentales o industriales, como los baños abiertos o lechos con aspersión.

$$Sc = \frac{\mu}{\rho_l D} \quad (2.3)$$

$$Re = \frac{L u_{sup} \rho_l}{\mu} \quad (2.4)$$

Para las frutas la solución osmótica usualmente es la sacarosa o jarabe, a una fracción de masa de 40 - 60% p/p o más. Estas soluciones tienen alta viscosidad y baja difusividad (Gekas y Mavroudis, 1998). Esto significa un elevado número de Schmidt Sc y números bajos de Reynolds Re , por lo general en régimen de flujo laminar.

La relación general que se aplica para el número de Sherwood Sh sobre superficies planas sometido a un flujo laminar paralelo se describe mediante la ecuación (2.5) (Treybal de 1968. Geankoplis, 1998):

$$Sh = \frac{k_c L}{D} = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (2.5)$$

El coeficiente promedio de transferencia de masa, k_c en m/s , es una función de la difusividad D en m^2/s y la longitud característica L en este caso la distancia m desde el borde de la superficie plana, se utiliza con diferencias en la concentración. Kmol/m^3 .

Se han derivado ecuaciones similares para las esferas, cilindros y otras formas, dentro de límites de incertidumbre a veces hasta $\pm 25\%$ (Geankoplis, 1998).

La forma de la muestra determina la superficie expuesta a la solución, así como el volumen encerrado por dicha superficie. El área de contacto efectivo puede ser difícil de estimar en las frutas que han sido picados o cortados en formas irregulares.

Las temperaturas para este proceso generalmente varían en el rango de la temperatura ambiente y 50 °C. Las temperaturas más altas producen una alteración de las membranas celulares, provocando que el fenómeno sea más difusivo y menos osmótico (Saurel et al, 1994). Por otra parte, cuanto mayor sea la temperatura es más baja la viscosidad y mayor la difusividad. La temperatura también tiene un efecto sobre las características mecánicas del tejido (Monsalve-González et al., 1993).

Como se mencionó anteriormente, la interacción entre el régimen de flujo y la transferencia de masa dentro del tejido determina el valor de la concentración en la interfaz (Bird et al., 1965).

Desde el punto de vista del tejido, esta concentración real externa tiene que ser considerado para propósitos de modelamiento de muchos sistemas prácticos, especialmente en lechos con aspersores (Wakao y Kaguei, 1982).

La proporción de líquidos y sólidos y la configuración de flujo (en contracorriente o en paralelo) producen diferentes gradientes de concentración externa (Saurel et al., 1994).

Los parámetros de la solución osmótica determinar el comportamiento de la deshidratación de un determinado tejido durante la DO. La mayoría de las soluciones utilizadas son soluciones acuosas de azúcares o sal (Yang y Le Maguer, 2007). Se han utilizado otros solutos sólidos, al igual que los sólidos de jarabe de maíz (Lazarides, et al., 1995), y líquidos, como el etanol (Biswal & Le Maguer, 1989) o glicerol (Garrote y Bertone, 1989). Le Maguer (1997) señaló la necesidad de la caracterización fisicoquímicas de estos sistemas. Una serie de soluciones osmóticas se han caracterizado en algunas publicaciones (Bouhon et al. 1997). La complejidad en el modelamiento se incrementa al considerar sistemas multicomponentes en la DO (Qi et al. 1999). La determinación de la presión capilar puede ser importante para estimar la impregnación inicial del tejido (Fito, 1994).

Se recomienda estimar la concentración de la solución en la interfase del tejido, así como la variación de la difusividad con la concentración para su modelamiento (Torreggiani. 1993).

B. Transferencia de Masa en el Tejido

Cuando una pieza de tejido se coloca en contacto con la solución osmótica, las células superficiales de las muestras de tejido en contacto con la solución osmótica inician la deshidratación, y genera un flujo de agua hacia los capilares y en la solución. El soluto comienza a migrar hacia los espacios extracelulares, y el agua comienza a difundirse en dirección opuesta (Fito, 1994). Si no se presenta un flujo a través de la membrana, sólo se considera la difusión equivolumétrica (Bird *et al.*, 1965). Sin embargo, tan pronto como la concentración en el espacio extracelular aumenta, las células ya no están en equilibrio y comienza un flujo de agua a través de la membrana. Este flujo de agua fuera de las células y en el espacio extracelular provoca un flujo neto de agua en los capilares en la dirección opuesta a la difusión de los solutos (Yao Le Maguer, 1996). Después de un período inicial de cambio rápido se puede llegar a un estado cuasi-estacionario (Mazzanti y Le Maguer. 1998). En esta etapa, el flujo difusional de azúcar está casi equilibrado por el flujo de azúcar que tiende a dejarse llevar por el flujo global de agua en la dirección opuesta.

En el espacio libre extracelular, el soluto es luego difundido a un flujo por advección causado por el flujo a través de la membrana. La concentración del soluto a una distancia a lo largo del capilar cambia en el tiempo según la ecuación (2.6) (Bird *et al.* 1965). La distancia se mide a lo largo del capilar, así como la velocidad neta del líquido:

$$\frac{\partial c_{sf}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_{sf}}{\partial s^2} - u \frac{\partial c_{sf}}{\partial s} \quad (2.6)$$

Esta ecuación asume que la difusividad puede considerarse constante, o al menos puede utilizar un valor promedio.

En un capilar semi infinito en contacto con una concentración constante c_i en la interfaz de la solución osmótica, para un valor de la independiente del tiempo. Las condiciones de contorno de una placa semi infinita ($c_{sf} \approx 0$ cuando la profundidad $s \rightarrow \infty$) son aplicables siempre y cuando la penetración de solutos no llega al plano medio de la muestra. Si c_{si} es la

concentración en la interfase entre el tejido de la muestra y el líquido osmótico, la solución para las condiciones de contorno tiene la forma:

$$\frac{c_{sf}}{c_{si}} = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left[\frac{s-ut}{2\sqrt{Dt}} \right] + e^{(us/D)} \operatorname{erfc} \left[\frac{s+ut}{2\sqrt{Dt}} \right] \right\} \quad (2.7)$$

La expresión (2.7) es rigurosamente verdadera si y solo si u y no cambia en el tiempo, u a pesar de que puede cambiar con s . Esta ecuación puede ser utilizada para estimar el perfil de concentración a lo largo de los capilares.

Salvatori (1997) estudio la evolución de la fracción de sólidos solubles en la fase líquida de láminas osmóticamente deshidratadas de manzanas Granny Smith. La profundidad de penetración desde la superficie de los sólidos fue proporcional a la raíz cuadrada del tiempo, de acuerdo con las ecuaciones de difusión general en los sólidos (Crank, 1975). Sin embargo, los perfiles de concentración de sólidos solubles fueron mucho mayores que las predecidas por las soluciones de la ecuación (2.2) que ofrece Crank (1975). Los perfiles más pronunciados fueron producidos por el flujo global de agua osmótica opuesta a la difusión del soluto osmótico. Los perfiles fueron descritos por una ecuación empírica adimensional (2.8) que ajustaban muy bien todos los datos experimentales (Salvatori et al., 1999). Por lo tanto, se puede utilizar para estimar la profundidad de penetración de la concentración de solutos experimentales a diferentes profundidades en el tejido. $Y_{d,t}$ Es una concentración adimensional de sólidos solubles en el tejido y es una penetración adimensional, es decir z/z_p .

$$Y_{dt} = \frac{KZ}{Z+(K-1)} \quad K = 1.13 \quad (2.8)$$

Esta ecuación es independiente del tiempo y concentración del soluto de la solución osmótica utilizada. Por lo tanto, implícitamente, predice que la concentración media adimensional en la zona activa del tejido es independiente del tiempo y la concentración.

El flux de agua a través de la membrana celular puede ser modelado utilizando la termodinámica irreversible (Marcotte y Le Maguer, 1991, Toupin et al., 1989, Yao y Le Maguer. 1996). El flujo es una función de la diferencia de potencial químico entre el agua en la célula y el agua en la solución que rodea la célula.

La contribución de cada una de las dos membranas (membrana plasmática, para la célula, y tonoplasto, por la vacuola) a la resistencia total es desconocida, y se supone que se comportan como uno solo se asume un coeficiente de reflexión igual a 1 para la diferencia del potencial químico, es decir, el agua solo se considera que se mueve a través de la membrana durante la deshidratación.

El flux de agua a través de la membrana, J_w^{cell} en $\text{kmol/m}^2\text{s}$, es proporcional a la diferencia de potencial químico del agua, $\Delta\mu_w$ en J/kmol . La constante de proporcionalidad es la permeabilidad, L_p en $\text{kmol}^2/\text{J.m}^2\text{s}$.

$$J_w^{cell} = L_p \Delta\mu_w \quad (2.9)$$

El potencial químico del agua, en la DO, depende de dos propiedades termodinámicas del sistema: actividad de agua, a_w y la diferencia en la presión ΔP , en Pa . Se puede escribir como:

$$J_w^{cell} = L_p \left[RT \ln \left(\frac{a_{wf}}{a_{wc}} \right) - v_w \Delta P \right] \quad (2.10)$$

Donde R es la constante universal de los gases, 8314 J/kmol.K y T es el tempreture absoluta en K . El volumen molar del agua es v_w , con un valor promedio de $0.018 \text{ m}^3/\text{Kmol}$. La actividad de agua del entorno celular, tiene que ser inferior a la actividad de agua de la célula a_{wf} , para producir un flujo osmótico de agua fuera de la célula. La permeabilidad de la membrana celular, usualmente, determina la velocidad del agua que atraviesa a través de ella. La permeabilidad de la célula de la planta varía entre $5 \times 3 \times 10^{-11}$ y $10^{-9} \text{ kmol}^2/\text{J.m}^2\text{s}$ (Nobel. 1983). Le Maguer (1994) midieron la velocidad de disminución del volumen de una célula en el tiempo, usando análisis microscópico. Estas medidas conducen a valores de permeabilidad similares.

Expresado en términos de fracciones molares y coeficiente de actividad la ecuación (2.10) se convierte en:

$$J_w^{cell} = L_p \left[RT \ln \left(\frac{\gamma_f(1-x_f)}{\gamma_c(1-x_c)} \right) - v_w \Delta P \right] \quad (2.11)$$

La diferencia en la fracción molar del soluto entre el líquido extracelular x_f y la solución dentro de las células x_c determina la fuerza motriz para la deshidratación. Si se asume que toda el agua en el tejido esta dentro de las células, la fracción de masa de sólidos solubles se puede determinar en

función del peso por métodos gravimétricos. El peso molecular de estos sólidos solubles se puede estimar por su composición. Los sólidos solubles son generalmente azúcares, ácidos orgánicos, sales y otros componentes menores (Nobel, 1983). El efecto de almidón y otras macromoléculas en la actividad de agua de las células pueden ser explicados de una manera diferente, es decir, calculando la cantidad de agua no osmótica asociada a él (Yao, 1994). Una vez que el peso molecular estimado es conocido, la savia puede ser tratada en términos molares, a pesar de que, rigurosamente, la depresión la actividad de agua de la matriz de los solutos presentes en la célula no sigue un comportamiento lineal con la fracción molar (Gekas *et al*, 1998). Dado que los procesos de DO no deben afectar a la cantidad de sólidos presentes en el interior de las células (Saurel *et al*, 1994) la concentración puede ser calculada en cualquier momento. La cantidad de agua perdida por el tejido es la cantidad total de agua que se pierde por las células menos el agua retenida en el espacio extracelular. La estimación de la pérdida de agua por las células es, por tanto, vinculado a la estimación de la porosidad, que se define como la fracción del líquido extracelular (Le Maguer *et al*, 2000).

La presión de turgencia en las células de una fruta fresca o vegetales suele ser alrededor de 400 o 500 kPa, y puede alcanzar más de 1.7 Mpa en las células plenamente turgentes (Lin y Pitt, 1986). La rigidez del tejido se basa en gran medida a la presión, y cuando se pierde, el material aparece empapada (Monsalve-González *et al.*, 1993). La presión de turgencia tiene un efecto considerable en el potencial químico del agua, permitiendo incluso para soluciones diluidas, inducir un flujo de agua fuera de la célula (Toupin *et al.*, 1989). Desde el punto de vista de la termodinámica irreversible este efecto puede ser descrito de acuerdo a la ecuación (2.10).

La forma en que la presión depende del volumen de la célula es una característica mecánica del tejido que influye en el proceso de transferencia de masa. Una expresión común para describir la relación entre la presión de turgencia y el volumen de la célula es la ecuación (2.12) (Dainty, 1976; Nobel, 1983).

$$dP = \xi \frac{dv_c}{v_c} \quad (2.12)$$

ξ es el coeficiente de elasticidad puede ser constante o variable con la presión. En la ecuación lineal (2.13) β_1 es la razón del cambio de ξ con

respecto a la presión, y β_0 es el valor que toma ξ cuando el tejido está cerca de realizar la plasmolisis, es decir, cuando la presión es casi nula.

$$\xi = \beta_0 + \beta_1 P \quad (2.13)$$

Cada tejido tiene un número característico de células por unidad de volumen (Nobel, 1983). este número puede variar en diferentes lugares de la misma muestra (Mavroudis *et al.*, 1998). Esta propiedad, que también está relacionada con la fracción de vacío y la porosidad, determina la cantidad de agua que se puede extraer de un trozo de material. El volumen aumenta la densidad celular durante la contracción del material, a menos que sus paredes celulares sean de una estructura rígida. La combinación de la densidad celular, volumen y el área de la superficie celular proporcionan un valor del área total disponible para la generación de agua osmótica en el espacio extracelular, por unidad de volumen (Yao y Le Maguer, 1996). Junto con las condiciones del flujo del agua estos rendimientos totales en el espacio extracelular determina la zona activa del tejido. Desde allí, el agua tiene que encontrar su camino fuera del tejido a través de los espacios capilares (Saurel *et al.* 1994).

La mayoría de los tejidos tienen aire en el espacio extracelular (Fito *et al.*, 1994. Salvatori, 1997). La fracción volumétrica de aire o de la fracción de vacío es la parte del volumen de tejido que se llena de aire, y por lo tanto no está disponible para el proceso de transferencia de masa. Manzanas Granny Smith tienen entre 20 y 25% de fracción de vacío. Los mangos tienen un 10% y los melocotones tienen entre 3 y 8%, dependiendo de la variedad.

Las peras, ciruelas, piñas y los albaricoques tienen apenas el 2% (Salvatori, 1997). Durante la DO, así mismo parte del aire puede desplazarse, ya sea por contracción o reemplazado por la solución, sobre todo en los procesos que utilizan infusión al vacío, como un fase inicial (Shi *et al.*, 1995).

El efecto de la contracción del tejido en la transferencia de masa durante la deshidratación ha sido destacado en varias publicaciones (Le Maguer Toupin, 1989). La contracción se considera en los modelos desarrollados por Hough *et al.* (1993). La suposición usual de la contracción isotrópica simplifica el modelado (Yao y Le Maguer, 1996), aunque los tejidos de manzana pueden mostrar un comportamiento casi anisótropo (Barat *et al.* 1996).

La contracción celular en las células de un tejido deshidratado sigue tres etapas, como se muestra en la Figura 2.11. La forma redonda representa la célula con la presión de turgencia y el hexágono de las paredes y los espacios extracelulares. La forma de la estrella representa la célula plasmolisada y las líneas los hilos celulares.

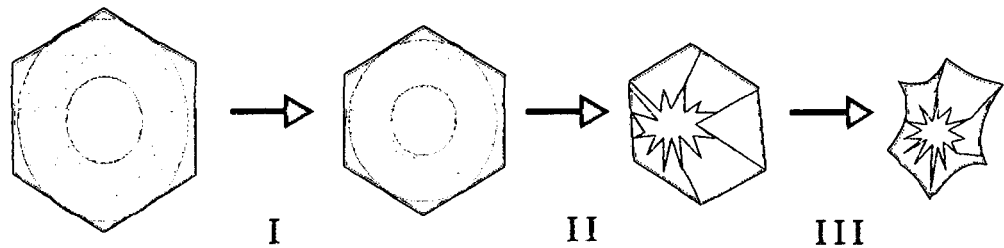


Figura 2.11. Etapas en la contracción de una célula

Etapa I pasa de un estado de turgencia a una de plasmólisis incipiente. El agua es removida de las células por la acción combinada de un gradiente de concentración y una diferencia de presión entre la célula y su entorno. La célula se reduce a medida que pierde agua y disminuye su área superficial así como su volumen.

Una vez que las paredes celulares llegan a un estado de reposo se inicia la etapa II, las paredes celulares ya no están bajo tensión de tracción. La membrana plasmática comienza a desprenderse de las paredes (plasmólisis). Durante esta etapa las paredes todavía son capaces de soportar la tensión de los hilos celulares sin sufrir deformación importante.

Las células entran en etapa III cuando las paredes inician el colapso, la disminución de las células de la matriz extracelular de las paredes celulares. Los volúmenes en escalas arbitrarias son graficadas en la figura 2.12 en función de la fracción molar en la célula. La fracción molar de la célula aumenta durante la deshidratación debido a que las células no dejan que los sólidos solubles sean expulsados como el agua.

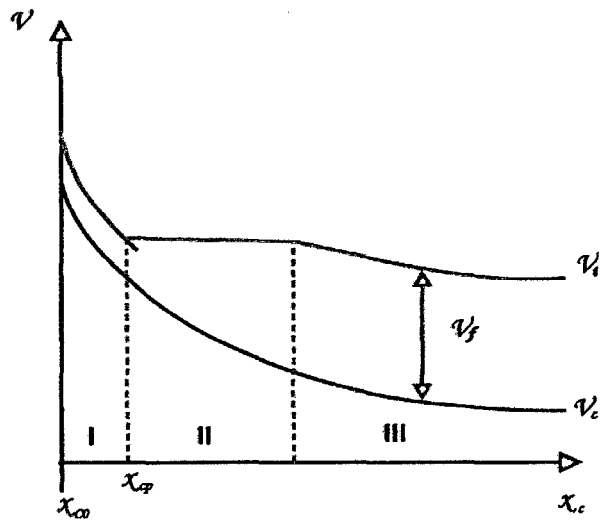


Figura 2.12. Volúmenes de Equilibrio de una Célula Unitaria (Toupin y Le Maguer. 1989).

El volumen V_f , de una unidad de célula, incluyendo las paredes celulares y el espacio extracelular, no sigue el mismo patrón de disminuir como el volumen de las células V_c . A medida que la fracción molar de los sólidos solubles en la célula x_c , se incrementa debido a la pérdida de agua, el volumen del espacio extracelular V_f que resulta de la diferencia $V_t - V_c$, puede aumentar o permanecer constante dependiendo de la etapa (Toupin y Le Maguer, 1989).

En la etapa I, el volumen extracelular V_f sufre pocos cambios en los tejidos de baja porosidad, como las papas, puesto que la presión dentro de la célula se mantiene. La membrana plasmática se estira y es empujada contra las paredes celulares estirada. En la etapa II, a medida que disminuye el volumen celular, aumenta el volumen extracelular V_f , a una poco similar a la velocidad de encogimiento de la célula, porque las paredes muestran muy poco encogimiento. En la etapa III, el volumen extracelular se mantiene más o menos constante, aunque el volumen total está disminuyendo en la misma proporción que el volumen de la célula, porque las paredes van disminuyendo a un ritmo similar al de las células.

Es necesario para el área superficial de la célula calcular el flujo de agua. La estimación del área superficial de la celular normalmente se hace asumiendo que la célula tiene una forma esférica o cilíndrica (Toupin *et al.*, 1989). Otras configuraciones, como un tetraédrico (poliedro de 14 caras) son más cercanas a la forma real de la mayoría de las células en los tejidos de

almacenamiento de la planta, pero la diferencia de superficie no es significativa. El área superficial de la membrana es variable en las etapas en que la presión está presente. Después de la plasmólisis, el área se mantiene constante en la mayoría de los tejidos, debido a que la célula se comporta como una bolsa de plástico, en lugar de un globo. (Marcotte y Le Maguer, 1991).

La porosidad, es la fracción de volumen de líquido extracelular. Sólo la fracción del espacio lleno de líquido extracelular está disponible para la transferencia de masa, debido a que el soluto no puede difundirse por el aire para llegar a las células internas (Saurel *et al.*, 1994). En muchas publicaciones el termino porosidad se utiliza para la fracción del aire o fracciones de vacío (Salvatori *et al.*, 1999).

La porosidad cambia la zona activa durante la deshidratación. El volumen total extracelular de la zona activa cambia durante la deshidratación (Salvatori, 1997). En una estructura rígida, las células se encogen dejando espacios que tienen un volumen exactamente igual a la del agua liberado desde las células (Marcotte y Le Maguer, 1991). En una estructura flexible, las paredes celulares retráctiles junto con las células y el espacio extracelular total no cambian.

Cada uno de estos casos extremos diferentes, requiere una metodología de modelamiento (Toupin *et al.*, 1989).

La tortuosidad es la relación entre la distancia medida desde la superficie de la muestra y la longitud real del camino que el agua y solutos tienen que viajar en el tejido, debido a la matriz entramado de los poros capilares y paredes celulares. Es probable que la tortuosidad cambie durante el proceso debido a la deformación de las estructuras del tejido (Saurel *et al.* 1994).

El equilibrio se alcanza cuando se detiene el flujo de masa (Argaiz *et al.*, 1994 y Vial *et al.* 1991). La ecuación termodinámica irreversible (2.11) ocurre cuando la diferencia del potencial químico del agua y solutos es cero. Esto es concuerda con la consideración de Lena y Flink (1984) que en el equilibrio de la actividad de agua de la solución osmótica y el tejido de la papa son iguales. Biswal & Bozorgmehr (1991) indican que el equilibrio se alcanza cuando la actividad de la fase acuosa del producto y la solución osmótica son iguales.

Otros autores se refieren sólo a la concentración de sustancias solubles en la fruta y la solución osmótica, considerando igualdad en el equilibrio (Lenart, 1992).

Azuara *et al.* (1992) utiliza los conceptos de la pérdida de agua y ganancia de sólidos en equilibrio como asíntotas para el modelo en la ecuación (2.14) y la ecuación (2.15).

La pérdida de agua en equilibrio PH_{∞} (por unidad de masa del tejido inicial), se definió como la asíntota de una expresión hiperbólica para calcular PH en función de una constante de tiempo S_t y el tiempo t . El mismo concepto fue utilizado para la ganancia de sólidos GS .

$$\frac{PH}{PH_{\infty}} = \frac{S_1 t}{1 + S_1 t} \quad (2.14)$$

$$\frac{GS}{GS_{\infty}} = \frac{S_2 t}{1 + S_2 t} \quad (2.15)$$

Varios autores, trabajaron con tiempos de tratamientos prolongados (varios días) señalando que después de algún tiempo el producto tiende a subir de peso y dejando el producto sumergido en la solución por mucho tiempo implica el resultado de un producto rico en solutos (Rauolt-Wack. 1994). Monsalve-González *et al.* (1993) trabajaron con frutas cilíndricas y láminas observando que las láminas pierden menos agua que los cilindros y que la ganancia de azúcar en las láminas son significativamente inferiores a los cilindros.

Barat (1998) explica estos fenómenos a largo plazo como una respuesta de la relajación del tejido de la matriz. Después que se alcanza el equilibrio químico con las células del tejido se expande lentamente, como una esponja, absorbiendo la solución osmótica.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 LUGAR DE TRABAJO

En el presente estudio, los análisis físicos, químicos y las pruebas experimentales se llevaron a cabo en los siguientes laboratorios:

- Laboratorio de Análisis de alimentos de la Facultad de Ingeniería en Industrias alimentarias – UNJBG.
- Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería e Industrias Alimentarias - UNJBG.
- Laboratorio de Procesos de la Facultad de Ingeniería – UNAMAD.
- Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Básicas – UNAMAD.

3.2 MATERIALES

3.2.1 Materia Prima

Se empleó el fruto de la carambola (*Averrhoa carambola L.*), de la variedad ácida, que se cosecharon en la localidad de Otilia, se seleccionaron de acuerdo al color de la cascara e índice de madurez (10.2 ± 0.2 °Brix; pH: 2.5 ± 1), para asegurar la uniformidad de la materia prima.

3.2.2 Sacarosa

Para la preparación de las soluciones osmóticas, se utilizó azúcar blanca comercial, marca CARTAVIO que se obtuvo de los supermercados de la ciudad de Puerto Maldonado, pero es procedente del norte del país.

3.2.3 Reactivos

- a. Agua Destilada, utilizada como disolvente en la preparación de las soluciones osmóticas.
- b. Otros reactivos empleados en diferentes análisis de la materia prima.

3.2.4 Equipos y Materiales de Laboratorio

a. Equipos

- Analizador de Humedad marca: SARTORIUS, modelo: MA45
- Agitador Magnético: Marca CIMAREC, modelo: S131120-3
- Balanza Analítica de Precisión: Marca Mettler AJ, modelo: AB 204-S 210g. serie: 1120501688, precisión de $\pm 0.0001\text{g}$.220V/60Hz.SUIZA.
- Cámara Digital: Marca Sony.
- Equipo extractor soxhlet
- Estufa marca TOMOS SA, modelo: ODHG-9053A.
- Picnómetro de 20 ml calibrado a 20°C de temperatura.
- Plancha de Calentamiento: Marca Fishe Serie: 208M0033, Modelo: SCIE 501-49H.
- Potenciómetro: Marca: JENWAY modelo: 3510. Serie .USA
- Refractómetro Universal ABBE: Marca ATAGO, modelo HRS-500, rango de medición de 60 a 90 °Brix, sensibilidad 0.1 a 0.2 °Brix. Alemania
- Refractómetro Marca ATC, rango de medición de 0 a 80 °Brix, sensibilidad 0.1 a 0.2 °Brix. Alemania
- Pie de rey
- Termómetros de mercurio
- Viscosímetro rotacional: Marca ARSA, modelo: LVT, Serie: 110676, Brookfield engineering Laboratories
- Microscopio marca Motic, modelo B3 Professional Series.

b. Materiales:

- Baguetas
- Bureta de 50ml.
- Campana desecadora
- Cronómetro
- Cuchillo
- Crisoles

- Envases de plástico para tomar muestra (crioviales de 1.5ml).
- Embudo de vidrio
- Fiolas de 1000ml y 500ml.
- Jeringas de 5ml.
- Luna de reloj
- Pinzas para crisoles
- Pipetas de 5ml
- Pizetas
- Vasos precipitados de 50 ml y 100ml

3.3 METODOS ANALITICOS PARA CARACTERIZAR EL FRUTO DE LA CARAMBOLA (*Averrhoa carambola* L.).

Para realizar el análisis fisicoquímico de la carambola (*Averrhoa carambola* L.), se utilizo los métodos según la AOAC de 1990 además de otros manuales a continuación se describe los análisis realizados:

3.3.1 Humedad

Se determinó mediante el método de secado en estufa a 60°C hasta peso constante por la técnica para frutas dulces de la AOAC 1990.

3.3.2 Grasa

Se determinó por el método de Soxhlet (AOAC 1990)

3.3.3 Proteína

Se determinó utilizando el método de Kjeldahl, el porcentaje de proteínas se obtuvo multiplicando la cantidad de nitrógeno por el factor 6.25 (AOAC 1990).

3.3.4 Ceniza

Se determinó por calcinación de la muestra en la mufla a 550°C por 4 horas (AOAC 1990).

3.3.5 Fibra

De acuerdo al método AOAC 1990.

3.3.6 Carbohidratos

Se determinó por diferencia de los porcentajes de humedad, grasa, ceniza, proteínas y fibra.

3.3.7 Sólidos Solubles

Se determinó empleando el refractómetro manual a una temperatura de 20°C.

3.3.8 pH

Se determinó empleando el potenciómetro.

3.3.9 Acidez Titulable

Según el método de la AOAC 1990.

3.3.10 Densidad

Según el método de la AOAC 1990.

3.3.11 Índice de Madurez

Se realizó mediante el Método Químico, donde se obtiene el índice de madurez por la relación del contenido de sólidos solubles del jugo, expresado en grados brix y la acidez total del mismo jugo.

3.4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Antes de comenzar los experimentos, todos los viales, los vasos de precipitado y los porta-muestras fueron etiquetadas con los datos de cada uno de los ensayos a realizar.

El baño maría fue de aproximadamente 10 cm de profundidad, 30 cm de ancho y 50 cm de largo (ver anexo 2).

La Figura 3.1, presenta el diagrama del flujo experimental para el proceso de DO del fruto de la carambola (*Averrhoa carambola* L.), variedad acida.

Análisis Físico Químico

- Índice de Madurez
- pH
- Acidez Titulable
- Sólidos Solubles

Hipoclorito de sodio 5 ppm

MATERIA PRIMA

Carambola (*Averrhoa carambola* L.) variedad ácida

SELECCIÓN Y
CLASIFICACIÓN

Medición de °Brix

LAVADO Y
DESINFECTADO

PELADO

CORTADO

En cubos de 1cm de lado.

LAVADO

PESADO

INMERSIÓN EN SOLUCIÓN
DE SACAROSA

DRENADO

MEDICIÓN DE
GRADOS BRIX

DETERMINACION DE
HUMEDAD

ANÁLISIS DE LOS DATOS

Tiempo	Relación Fruta : Solución
60 min	1 : 2
120 min	1 : 4
180 min	5 : 8
240 min	3 : 8
300 min	1 : 7

Concentración de la solución	Temperature
50 °Brix	20 °C
55 °Brix	30 °C
60 °Brix	40 °C
65 °Brix	50 °C
70 °Brix	60 °C

Figura 3.1. Diagrama de Operaciones para la Deshidratación Osmótica del fruto de la Carambola (*Averrhoa carambola* L.), Variedad ácida

Fuente: Elaboración Propia (2009)

3.4.1 Operaciones en el Proceso de Deshidratación Osmótica de la Carambola (*Averrhoa carambola* L.)

A. Selección y Clasificación

En la selección se eliminaron aquellos frutos que no presentaron cualidades apropiadas para el procesamiento (magullados, picados por insectos, etc).

Para clasificar el tamaño de la fruta se eligieron entre aquellas que tuvieron un diámetro de 6 a 8 cm. y una altura de 8 cm 10 cm.

Con respecto a la madurez de la fruta, solo se escogieron aquellas que presentaran síntomas evidentes de madurez de acuerdo al color de la cáscara, y a la prueba del almidón, así mismo se determinó los sólidos solubles entre un rango de 10.2 ± 2.2 °Brix.

B. Lavado

El lavado se llevó a cabo en forma manual, con agua potable y fricción, con fin de eliminar los residuos de tierra existente y otros.

C. Pelado

Se realizó en forma manual empleando para ello cuchillos de acero inoxidable, muy práctico para retirar la cáscara de la matriz sólida de la fruta.

D. Cortado

Se utilizó cuchillos de acero, para cortar la matriz sólida de la fruta en cubos de 1cm de lado. De cada carambola (*Averrhoa carambola* L.), fueron cortados 8 cubos. Ellos se organizaron de acuerdo con un calendario para cada ensayo; uno de ellos fue utilizado para la determinación de la humedad inicial, mientras que el resto se utilizó como muestra para el ensayo. Los cubos se han organizado en vasos etiquetados, de modo que las muestras se pudieron identificar sin confusión. Los cubos fueron pesados y se midió sus dimensiones con un Vernier.

E. Inmersión en solución de sacarosa

Se preparó cerca de 1 kilogramo de solución osmótica (50, 55, 60, 65 y 70 °Brix), según el diseño experimental, y con el fin de prevenir el crecimiento de levaduras y mohos se añadió a la solución 0.1% de ácido cítrico. La solución se mezcló muy bien con el agitador magnético hasta diluir completamente el azúcar y se tornara de un color transparente y homogéneo.

Las soluciones se prepararon el mismo día en que se efectuaron los ensayos, a una temperatura ambiente (25°C) y se analizó grados brix antes de cada uso con un refractómetro de mano.

Tras el ajuste de los grados brix la solución fue trasladada a un baño maría, que se muestra en el anexo 1. Los cubos de carambola fueron colocadas en vasos de precipitado de 50ml manteniendo los valores de las variables independiente de acuerdo al ensayo. La temperatura fue monitoreada con un termómetro y se mantuvo constante.

F. Drenado

Después del tiempo programado según el diseño experimental, se procedió a retirar los cubos de la solución de sacarosa. El drenado tuvo como finalidad eliminar la mayor cantidad de solución de sacarosa de la superficie de los cubos de fruta para ello se utilizó canastillas por un tiempo aproximado de 5 minutos.

G. Determinación de Humedad

Las pruebas se realizaron de acuerdo a un diseño experimental Compuesto central registrándose las mediciones según los intervalos de las variables independientes. Al finalizar el tiempo de inmersión se determinó la humedad de los cubos de fruta, colocando una muestra en el determinador de humedad el cual se programo a secado estándar de 105°C, hasta peso constante.

H. Medición del peso final de los cubos de fruta

Los cubos de fruta ya drenado se pesaron en la balanza analítica.

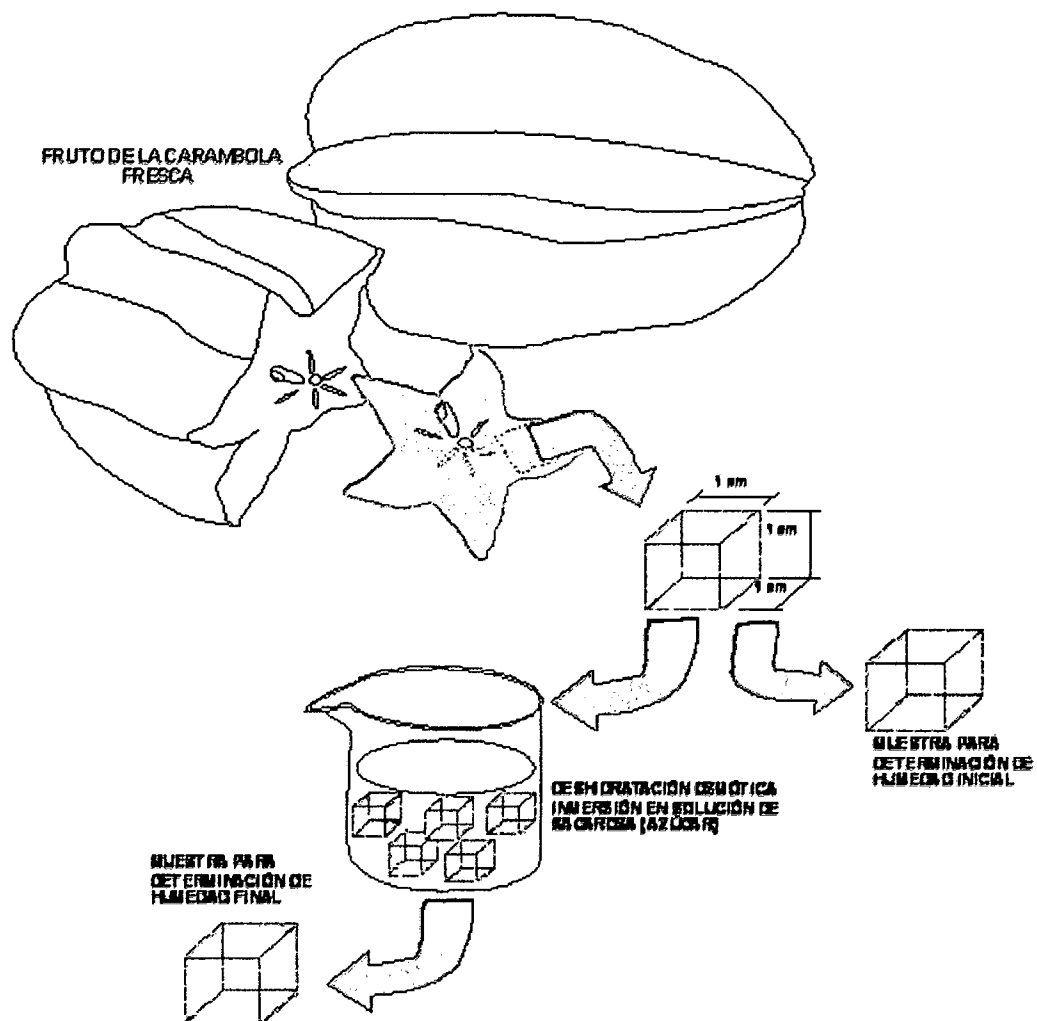


Figura 3.2 Esquema de la Obtención de los cubos de fruta para el proceso de Deshidratación Osmótica del fruto de la Carambola (*Averrhoa carambola* L.), Variedad ácida

Fuente: Elaboración Propia (2009)

3.4.2 Diseño Experimental utilizando Superficie de Respuesta

Para estudiar los efectos de las variables independientes sobre las respuestas en el proceso de deshidratación osmótica de la carambola; fue utilizado el diseño compuesto central tomando k el valor de cuatro factores (Concentración solución osmótica, Temperatura de proceso, Tiempo de operación, Relación sólido: solución osmótica). Los valores reales y la amplitud se muestran en el cuadro 3.1. El diseño estadístico requiere de un mínimo de experimentos los cuales fueron determinados de acuerdo a la ecuación 3.1.

$$N = 2^k + 2k + \alpha \quad (3.1)$$

Donde 2 representa los niveles del diseño, superior e inferior, K es el número de variables y α el número de repeticiones en el punto central entonces de la ecuación 3.1 se determino realizar 27 pruebas experimentales (ver cuadro 3.2).

Cuadro 3.1. Factores y Niveles de las Variables Independientes para el Diseño Compuesto Central.

VARIABLES	UNIDAD	NIVEL				
		$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Tiempo	min	60	120	180	240	300
Concentración	°Brix	60	55	50	65	70
Relación F/S	g/g	1:7	1:4	3:8	1:2	5:8
Temperatura	°C	20	30	40	50	60

Fuente: Elaboración Propia (2009)

En el cuadro 3.2 se representan los valores codificados y reales del delineamiento experimental del diseño compuesto central con tres repeticiones en los puntos centrales para cuatro variables independientes y cinco niveles de variación.

Las variables respuestas (Y_1 y Y_2) o variables dependientes fueron la pérdida de agua (PH) y la ganancia de sólidos (GS).

Cuadro 3.2. Matriz de Diseño Experimental Compuesto Central, con Niveles Codificados y Reales para el Análisis de los Efectos de las Variables Independientes en el Proceso de Deshidratación Osmótica del Fruto de la Carambola (*Averrhoa carambola* L.)

Prueba Exp.	Tiempo (minutos) X_1		Concentración de Jarabe (°Brix) X_2		Relación Fruta:Sol. Conc. (g/g) X_3		Temperatura (°C) X_4	
	Codificado	Real	Codificado	Real	Codificado	Real	Codificado	Real
01	-1	120	+1	65	-1	1:4	-1	30
02	+1	240	+1	65	+1	1:2	-1	30
03	+1	240	-1	55	-1	1:4	+1	50
04	-1	120	-1	55	-1	1:4	+1	50
05	+1	240	+1	65	-1	1:4	-1	30
06	-1	120	+1	65	+1	1:2	+1	50
07	+1	240	-1	55	+1	1:2	+1	50
08	-1	120	-1	55	+1	1:2	+1	50
09	$-\alpha$	60	$-\alpha$	60	0	3:8	0	40
10	+1	240	-1	55	-1	1:4	-1	30
11	-1	120	-1	55	+1	1:2	-1	30
12	0	180	$-\alpha$	60	0	3:8	0	40
13	+1	240	+1	65	-1	1:4	+1	50
14	0	180	$-\alpha$	60	$-\alpha$	1:7	0	40
15	$+\alpha$	300	$-\alpha$	60	0	3:8	0	40
16	+1	240	+1	65	+1	1:2	+1	50
17	0	180	$-\alpha$	60	0	3:8	0	40
18	0	180	$-\alpha$	60	$+\alpha$	5:8	0	40
19	0	180	0	50	0	3:8	0	40
20	-1	120	+1	65	+1	1:2	-1	30
21	-1	120	+1	65	-1	1:4	+1	50
22	0	180	$-\alpha$	60	0	3:8	$+\alpha$	60
23	-1	120	-1	55	-1	1:4	-1	30
24	+1	240	-1	55	+1	1:2	-1	30
25	0	180	$-\alpha$	60	0	3:8	$-\alpha$	20
26	0	180	$-\alpha$	60	0	3:8	0	40
27	0	180	$+\alpha$	70	0	3:8	0	40

Fuente: Elaboración Propia (2009)

STATGRAPHICS PLUS Versión 5.1.

Para determinar los valores de las variables dependientes (PH y GS), se utilizaron las siguientes ecuaciones (Sharman S. *et al*; 2003):

$$GS_t = \frac{(W_0 X_0 - W_t X_t)}{S_o} \quad (3.2)$$

$$PH_t = \frac{(W_0 - W_t)}{S_o} \quad (3.3)$$

3.4.3 Modelos Matemáticos de Transferencia de Masa

El Modelo de Crank (1964), consiste en un grupo de soluciones de la ley de difusión de Fick para diferentes geometrías, condiciones límite y condiciones iniciales desarrolladas por Crank.

Con el modelo de Crank, 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 semiinfinito 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 DO (Yao y Le Maguer, 1997).

En las ecuaciones (3.4) a la (3.7) se presenta la solución para láminas planas semi-infinitas (Singh B. *et al.*, 2007):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \dots \quad (3.4)$$

$$MR = \text{Razón de Humedad} = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3.5)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha(1+\alpha)}{1+\alpha+\alpha^2 q_n^2} \exp \left[\frac{-D_e q_n^2 t}{L^2} \right] \quad (3.6)$$

Similarmente para la ganancia de sólidos:

$$RGS = \text{Razón de Ganancia de Sólidos} = \frac{C - C_e}{C_0 - C_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha(1+\alpha)}{1+\alpha+\alpha^2 q_n^2} \exp \left[\frac{-D_e q_n^2 t}{L^2} \right] \quad (3.7)$$

Donde:

$q_n = -\alpha q_n$ En la ecuación son los ceros raíces positivas

y

$$\alpha = m \frac{V_L}{V_S} \quad (3.8)$$

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 (Le Maguer, 2002).

$$\frac{M_0^i - M_t^i}{M_t^0} = kt^{0.5} + k_0 \quad (3.9)$$

Donde k y k_0 son parámetros cinéticos empíricos, pero se les puede asignar un significado físico; k se asocia con las velocidades de transferencia de agua y de solutos que ocurren a través del mecanismo osmótico-difusional (constante cinética de difusión) dado que la transferencia de masa que ocurre por mecanismos difusionales es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo en procesos cortos de acuerdo a la ecuación de Crank y k_0 cuantifica la ganancia o pérdida de masa que ocurre después de tiempos de proceso muy cortos debido a la acción del HDM promovido por presiones impuestas o capilares (Giraldo *et al.*, 2003). Este modelo sólo es válido para tiempos cortos (Parjoko *et al.*, 1996) o sea durante las primeras etapas de deshidratación, en las cuales los cambios son mas relevantes para los procesos industriales (Serenio *et al.*, 2001).

Sereno et al. (2001) definen los parámetros k_0 y k como coeficientes globales de transferencia de masa ya que tienen en cuenta las resistencias internas y externas a la transferencia, lo que no hace el modelo de Crank.

Azuara (1992), modelo la pérdida de agua y la ganancia de sólidos en la DO a partir de los balances de masa, obteniendo ecuaciones que requieren dos parámetros ajustables.

Balance de masa para el agua

$$\Delta M_t^w = \Delta M_\infty^w - M_m^w \quad (3.10)$$

Donde M_m^w es el agua capaz de difundirse que permanece en el alimento en un tiempo t .

Como la pérdida de agua es función del agua que es capaz de difundirse y del tiempo (si se tienen la concentración de la disolución osmótica y la temperatura constantes), entonces.

$$\Delta M_t^w = s_1 t M_m^w \quad (3.11)$$

Obtenemos la expresión de ganancia de sólidos.

$$\Delta M_t^{ss} = \frac{s_2 t \Delta M_\infty^{ss}}{1 + s_2 t} \quad (3.12)$$

S_1 y S_2 son parámetros que pueden definirse como constantes de velocidad relativas a la pérdida de agua y a la ganancia de sólidos respectivamente.

Biswal y Bozorgmehr (1992), modelaron la pérdida de humedad y la ganancia de soluto en función de la composición de la disolución osmótica, la temperatura y el tiempo de contacto.

Se definieron dos parámetros de concentración, la pérdida de humedad expresada como una fracción de la humedad original de la muestra.

$$\Delta M_t^w = \frac{(M_0^0 x_0^w) - (M_t^0 x_t^w)}{M_0^0 x_0^w} \quad (3.13)$$

La molalidad equivalente C expresada en kgmol de soluto/kg de agua.

$$C = \frac{10^3}{x_t^w} \left(\frac{x_t^{sal}}{M_{sal}} + \frac{x_t^{azucar}}{M_{azucar}} \right) \quad (3.14)$$

Donde M_{sal} y M_{azucar} son los pesos moleculares del cloruro de sodio y la sacarosa respectivamente.

El modelo de Palou *et al.* (1994), esta basado en la ecuación de Peleg y redefine sus ecuaciones para el proceso de DO de la siguiente manera:

Para la pérdida de agua:

$$\frac{t}{x_0^w - x_t^w} = k_{1,w} + k_{2,w}t \quad (3.15)$$

Para la ganancia de sólidos:

$$\frac{t}{(x_t^{ss} - x_0^{ss})} = k_{1,ss} + k_{2,ss}t \quad (3.16)$$

El modelo de Panagiotou *et al.* (1998) propuso un modelo semiempírico que supone la dependencia de la pérdida de agua y la ganancia de sólidos con la concentración de la solución, la temperatura, el tiempo de inmersión, la velocidad de la agitación y el tamaño de la muestra.

Ajuste polinómicos, son modelos empíricos sencillos, validos solamente para las condiciones experimentales a partir de las que se obtuvo el modelo, es decir se requiere una expresión para cada conjunto de datos experimentales a unas condiciones dadas. Con estos ajustes no siempre se obtienen buenos coeficientes de correlación.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 DEL FRUTO DE LA CARAMBOLA (*Averrhoa carambola* L.)

4.1.1 Características Físicas

Las carambolas (*Averrhoa carambola* L.) Variedad Ácida, seleccionadas para el presente trabajo, presentan las características físicas que se muestran en el cuadro 4.1 donde se reporta que el peso fresco fue de 102 g con una desviación estándar de ± 1.23 g.

Cuadro 4.1. Características Físicas de la Carambola (*Averrhoa carambola* L.), seleccionada variedad ácida

CARACTERISTICA	UNIDADES
	PESO (g)
Peso unitario	102.45 $\pm$ 1.23
Dimensiones:	
- Altura	12 Centímetros (cm)
- Densidad	1.3 g/cm ³
- Calibre	102.45 $\pm$ 1.23 (A)

Fuente: Elaboración Propia (2009)

En cuadro 4.1 se puede observar las dimensiones del fruto de la carambola, variedad ácida de acuerdo a reportes de diferentes autores para las diversas variedades de carambola; a nivel mundial, se encuentran dentro de los valores que se reportan. Por otro lado, los valores de peso fresco de esta variedad concuerdan con los mencionados por Galán (1991) como deseables para la comercialización en fresco (pesos entre 100 y 300 gramos).

4.1.2 Índice de Madurez

Usualmente determinamos el índice de madurez por la relación de sólidos solubles de la fruta y su acidez (análisis fisicoquímico), sin embargo también se considera el análisis sensorial mediante la coloración de la pulpa en presencia de lugol o llamada también prueba de almidón. Ocurre que el lugol es coloreado azul en presencia de almidón y esto indica la falta madurez en la fruta y en ausencia de color azul indica que el almidón no se encuentra presente entonces decimos que la fruta esta madura.

El cuadro 4.2 presenta las características de la carambola seleccionada con respecto a su índice de madurez y en la figura 4.1 se puede observar una imagen de ella.

Cuadro 4.2. Características del Índice de Madurez de la Carambola
(*Averrhoa carambola L.*)

PRUEBA	REPORTE
ALMIDON	NEGATIVO
INDICE DE MADUREZ	40.38 ± 2.05
Sólidos solubles (°Brix)	10.20 ± 2.2
Acidez (Expresado en % de ácido cítrico)	0.23 ± 0.05
I.M (SS/Acidez)	40.38 ± 2.05

Fuente: Elaboración Propia (2009)

Como se observa la ausencia de almidón en la muestra seleccionada es debido a que la fruta ya está en su estado de madurez adecuada, sin embargo esta prueba no indica que madura o tan madura se encuentra.

Con respecto al índice de madurez se indica 40.38 ± 2.05 en otras investigaciones, los valores han sido diferentes unos con otros.

Cabe señalar que la variación del índice de madurez esta influenciada en muchos casos con la labor agrícola (abono, suelo, clima riego, etc)

Según a lo reportado por Agronet (2000), la acidez total titulable (ATT) disminuye durante el desarrollo del fruto de carambola en contraste con el pH, el cual presenta valores entre 1.72 y 2.7; normalmente los valores de pH en los últimos estados de desarrollo oscilan alrededor 1.52 y 2.01. La acidez total titulable expresada como porcentaje de ácido oxálico oscila entre 1.02% y 0.35%. El comportamiento de la acidez total titulable es consecuencia de la degradación de los ácidos oxálico, málico y succínico, puesto que los ácidos orgánicos son utilizados como una fuente de energía respiratoria durante la maduración.



Figura 4.1. Fruto de la carambola (*Averrhoa carambola L.*)

4.1.3 Análisis Físico-Químico

Los análisis fueron realizados a las muestras seleccionadas con rango de IM 40.38 ± 2.05 . El análisis fisicoquímico se muestra en el cuadro 4.3.

Cuadro 4.3. Análisis físico-Químico de la Matriz Solida de la Carambola (*Averrhoa carambola* L.) variedad Acida (IM = 40.38 ± 2.05)

COMPONENTE	RESULTADOS	REPORTADO Calzada B. J (1980)
Humedad (%)	88.77	90
Proteína (%)	0.202	0.5
Grasa (%)	0.149	0.3
Fibra (%)	1.76	0.6
Carbohidratos (%)	10.01	9.0
Ceniza (%)	0.107	0.4

Fuente: Elaboración Propia (2009)

Realizado en el Laboratorio Química-UNJBG-Tacna

Los resultados muestran que la carambola (*Averrhoa carambola* L.) variedad Acida, es una fruta muy jugosa pero a la vez contiene mínimas cantidades de grasa y proteínas, típica en frutas y hortalizas; Charley (1991) menciona que las frutas tienden a ser jugosas debido a su alto contenido en agua, cuyos porcentajes pueden variar desde 75% hasta el 90%. Y con respecto a las proteínas indica que las frutas tienen cantidades relativamente suficientes para los procesos vitales de la planta, pero no suficiente para constituir un aporte importante a las necesidades diarias del cuerpo humano.

4.2 DE LA SACAROSA (AZUCAR) Y LAS SOLUCIONES

El insumo principal de este trabajo de investigación fue el azúcar (sacarosa). Se adquirió de los supermercados de la ciudad. La marca de azúcar blanca es denominada "CARTAVIO", procedente del norte del país. En el cuadro 4.4 se muestra el análisis realizado a este producto.

Cuadro 4.4. Análisis Químico del Azúcar Blanca Comercial marca "CARTAVIO"

COMPONENTE	RESULTADOS
Humedad (%)	0.76
Carbohidratos (%)	99.217
Ceniza (%)	0.023
Densidad Real (g/cm ³)	1.5714

Fuente: Elaboración Propia (2009)

Análisis realizado en la UNJBG-Tacna

Los resultados muestran una humedad superior al límite de acuerdo a la norma técnica (NTP 207.029-1987), esto debido a las condiciones ambientales de Puerto Maldonado, sin embargo sirve para los propósitos de análisis gracias al buen color, forma y apariencia que presenta.

Cuadro 4.5. Propiedades Características de las Soluciones Utilizadas en las Pruebas Experimentales

CONCENTRACIÓN (°Brix)	AZUCARES REDUCTORES (%)	DENSIDAD 25°C (g/cm ³)	PRESION OSMOTICA* (Atm) en 500ml de jarabe
50	2.067	1.113	46.688
55	2.274	1.224	51.357
60	2.890	1.280	57.252
65	3.690	1.310	63.948
70	4.490	1.340	70.889

(*) Resultado de la ecuación de Van't Hoff

Fuente: Elaboración Propia (2009)

En el cuadro 4.5 se muestra valores de algunas propiedades características de las soluciones preparadas a partir de la azúcar blanca comercial las cuales se utilizaron en las pruebas experimentales.

En la preparación de las soluciones saturadas se aplicó calor (60°C) para mejorar la solubilidad de las soluciones, en especial las más altas concentraciones.

La densidad aumenta a medida que la concentración es alta al igual que la presión osmótica. Con el objetivo de estandarizar el refractómetro en la concentración de grados brix de la solución, se procedió a la preparar soluciones de distintas concentraciones (50 a 70°Brix), las mismas que se presentan en la figura 4.2 donde podemos observar un error de 0.1°Brix.

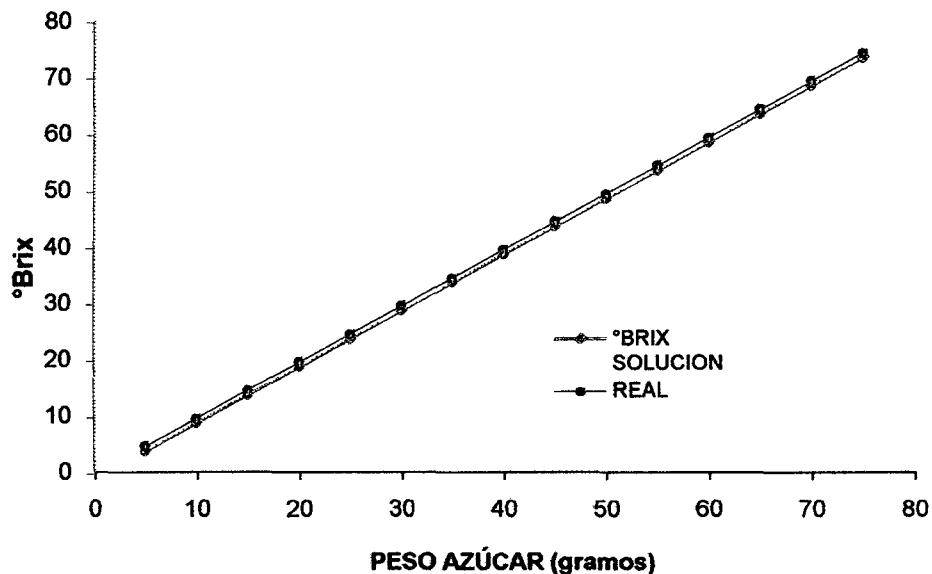


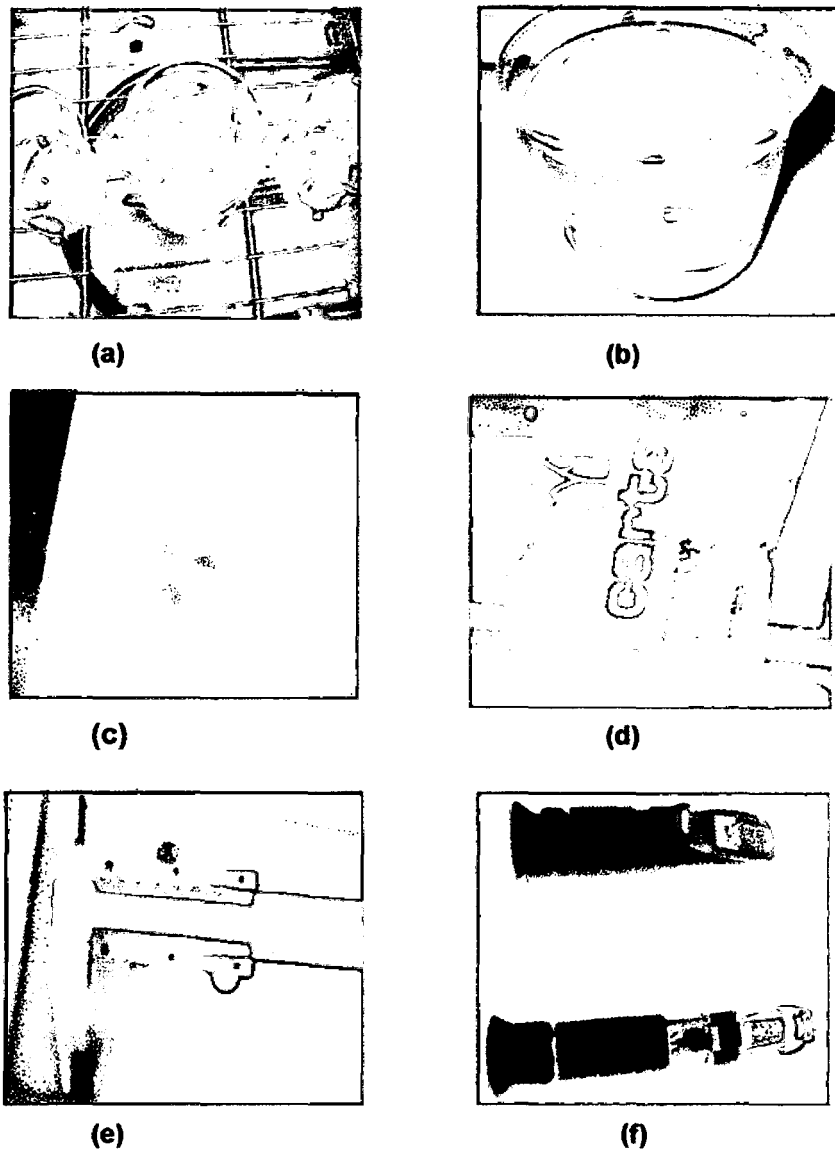
Figura 4.2. Curva de Calibración del Refractómetro para la Medición de Grados Brix.

4.3 DEL PROCESO DE DESHIDRATACION OSMOTICA

4.3.1 Acondicionamiento de la muestra

Se acondicionó el fruto de la carambola (*Averrhoa carambola* L.), retirando manualmente la cascara y semillas con un cuchillo de acero inoxidable para luego ser cortadas en trozos cúbicos de 1cm de lado.

En la figura 4.3 se muestran los materiales e insumos que se utilizaron y la forma en la cual la fruta se mantuvo durante el proceso de DO.



a) Disposición de la fruta durante la deshidratación osmótica; b) Solución temperada según el experimento, c) Carambola seleccionada, pelada y cortada en cubos d) Insumos (Azúcar), e) Vernier, f) Refractómetros de mano.

Figura 4.3. Materiales e Insumos Utilizados en el Desarrollo de las Pruebas Experimentales

Fuente: Elaboración Propia (2009)

La caracterización del fruto se realizó de acuerdo a los métodos de análisis dados por la AOAC de 1990.

4.3.2 Análisis Microscópico de las muestras de fruta antes y después de la Deshidratación Osmótica.

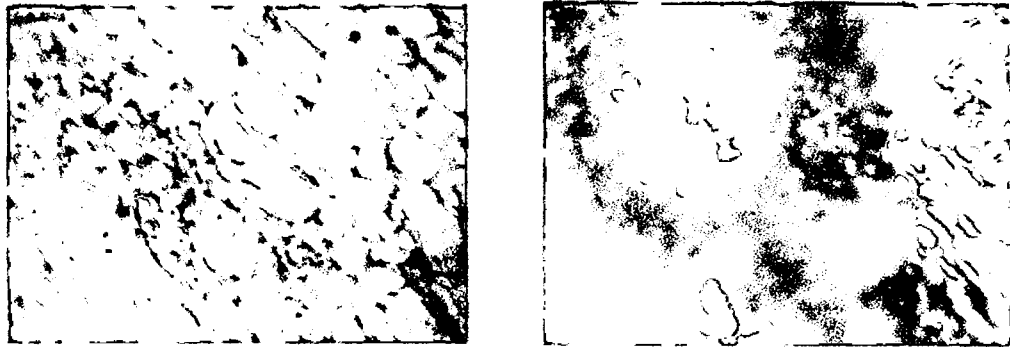


Figura 4.4. Láminas de fruta fresca vistas al microscópico óptico (4x), antes de la Deshidratación Osmótica.

Fuente: Elaboración Propia (2009)

En las fotografías a la vista de un microscópico óptico (4x), muestra una imagen de los cubos del fruto de la carambola en estado fresco, antes del inicio del proceso de deshidratación osmótica, donde se aprecian células parenquimáticas de diferentes tamaños. También se puede observar células parenquimáticas grandes, vacuoladas y de paredes delgadas.

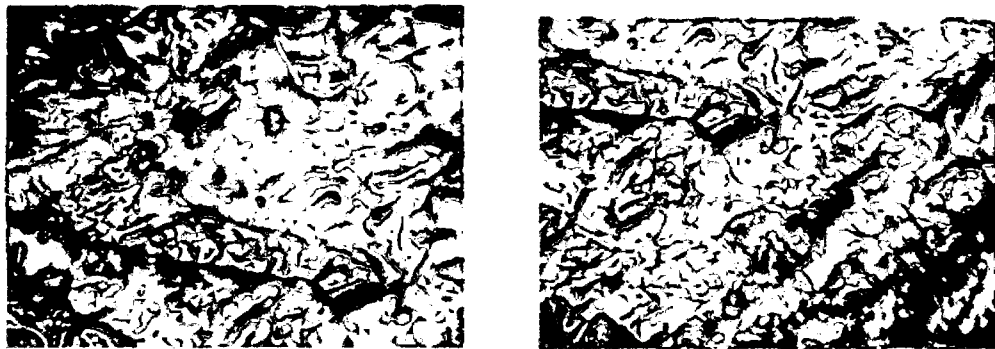


Figura 4.5. Láminas de fruta deshidratada a la vista de un microscópico 4x después de la inmersión en solución saturada de sacarosa.

Fuente: Elaboración Propia (2009)

En las figuras 4.4 y 4.5, no se pudo observar claramente el fenómeno de turgencia tal como indica salvatori (1997), que utiliza un microscopio electrónico de barrido diferente al utilizado en el presente trabajo el cual fue un microscopio óptico con limitada resolución; con esta limitación comparando las fotografías antes y después de la DO observamos que las bolsas de humedad existentes al inicio han sido evacuadas y reemplazadas parcialmente por la solución osmótica y otra parte han sufrido una deformación debido a la plasmólisis.

4.3.3 Modelamiento del Proceso de DO Utilizando Diseños Experimentales.

Los ensayos fueron agrupados de acuerdo a la temperatura de experimentación (temperatura en Baño María), trabajándose con 5 temperaturas según el diseño experimental compuesto central. Para pesar las muestras iniciales y finales se utilizó la balanza analítica Mettler de capacidad de $210\text{g} \pm 0.0001\text{g}$.

La fracción de sólidos solubles, se determinó a partir de las muestras de carambola (*Averrhoa carambola* L.), utilizando un refractómetro de mano.

El valor promedio para la fracción de sólidos solubles fue 0.102 ± 0.02 kg de sólidos solubles/kg de carambola. Calzada B. J, (1980) reporta un valor de 0.1035 ± 0.0004 kg de sólidos solubles/kg de carambola, siendo el calculo similar.

4.3.4 Pérdida de Agua y Ganancia de Sólidos (Sacarosa)

La revisión bibliográfica de deshidratación osmótica define claramente la Pérdida de agua y ganancia de sólidos. La pérdida de agua es el peso del agua que se pierde durante el tratamiento por unidad de peso de material inicial. La ganancia de sólidos, de manera similar, se calcula como el peso de sólidos obtenido por unidad de peso del material inicial.

Dos diferencias deben señalarse en el presente trabajo, en primer lugar, el aumento de sacarosa se determinó con el aumento de los sólidos solubles. En segundo lugar, las cantidades absolutas de pérdida de agua y sacarosa durante el proceso parece ser independiente del espesor inicial (y por lo tanto el peso) de los cubos.

La sacarosa es el azúcar presente sólo en la solución, pero pueden haber sido sometidos a una hidrólisis interior de los cubos de carambola debido a la presencia de ácido cítrico naturalmente en la fruta. Sin embargo, esto no afecta de manera significativa; el aumento de la sacarosa se considera responsable de toda la ganancia de sólidos.

La evolución de la pérdida absoluta de agua con el tiempo se muestra en las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13.

Los resultados de ganancia de sacarosa absoluta en las figuras 4.6 a la 4.10 son más dispersos. Los únicos grupos de datos que mostraron una significativa (aunque poco) diferencia (nivel de 0.05) son los obtenidos en un tiempo de 180 minutos. La variabilidad del contenido de sacarosa inicial en las muestras

frescas (2.2 ± 0.4 °Brix p/p) explica la mayor parte de la variabilidad de los resultados.

Por lo tanto, los valores en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13, están en gramos de agua que se pierde y los de las figuras 4.6, a la 4.10 están en gramos de sacarosa adquirida.

En el cuadro 4.6 se reportan la ganancia de sólidos y pérdida de agua con respecto a los efectos de las variables independientes (tiempo, concentración de solución, relación F:S y temperatura) en el proceso de DO.

Cuadro 4.6. Efecto de las Variables Tiempo, concentración de solución, relación Fruta: Solución y Temperatura en el Proceso de DO. Evaluados a través de la Ganancia de Sólidos y Pérdida de Agua.

Prueb. Exp	TIEMPO X_1	CONCENTRACION SOLUCION X_2	RELACION Fruta:Soluc X_3	TEMPERATURA X_4	Ganancia Sólidos GS_t	Pérdida de Agua PH_t
Nº	Minutos	°Brix	g/g	°C	(g/g)	(g/g)
01	+1	-1	+1	+1	1.98	5.59
02	+1	+1	-1	+1	1.78	6.29
03	-1	-1	-1	+1	1.39	4.50
04	+1	-1	-1	+1	2.12	6.65
05	0	- α	0	0	1.69	6.16
06	0	+ α	0	0	2.62	5.77
07	+1	-1	+1	-1	3.42	6.71
08	0	- α	0	0	0.92	6.44
09	+ α	- α	0	0	1.89	6.79
10	0	- α	0	+ α	2.40	6.06
11	0	0	0	0	2.81	4.75
12	+1	+1	+1	-1	1.83	4.03
13	+1	-1	-1	-1	1.84	5.87
14	0	- α	+ α	0	2.02	5.83
15	0	- α	0	0	2.71	5.75
16	0	- α	0	- α	0.99	3.84
17	-1	+1	-1	+1	2.32	5.72
18	-1	-1	+1	+1	1.97	4.41
19	-1	-1	+1	-1	1.89	4.15
20	-1	+1	+1	+1	1.96	4.64
21	0	- α	- α	0	1.96	6.64
22	-1	+1	-1	-1	1.28	3.15
23	+1	+1	-1	-1	1.45	5.19
24	+1	+1	+1	+1	1.79	5.77
25	-1	+1	+1	-1	0.87	2.79
26	- α	- α	0	0	2.24	4.25
27	-1	-1	-1	-1	2.52	4.91

Fuente: Elaboración propia (2009)

Este diseño experimental permitió determinar que variables son más significativas y en que niveles son más efectivas.

Primeramente se obtuvo las ecuaciones o modelos de regresión para cada variable respuesta (Ganancia de sólidos y Pérdida de agua). El resultado un modelo de regresión polinómica que se ajusta a los datos experimentales considerando el efecto de las interacciones de los componentes.

En el cuadro 4.7 se muestran los modelos de regresión completa para Ganancia de sólidos y Pérdida de agua, en función a sus variables independientes (tiempo, concentración de solución, relación F:S y temperatura).

Cuadro 4.7. Modelos de regresión completa para Ganancia de sólidos y Pérdida de agua, en DO de la carambola (*Averrhoa carambola* L.), variedad ácida.

VARIABLE DEPENDIENTE	ECUACIÓN
Ganancia de sólidos (GS _t)	$GS = 35.905 + 0.015A - 1.044B + 7.450C - 0.242D$ $- 2.428 \times 10^{-4}AB + 0.024AC - 2.040 \times 10^{-4}AD$ $- 0.189BC + 5.789 \times 10^{-3}BD + 7.441 \times 10^{-3}B^2$ $- 6.967 \times 10^{-4}D^2$
Pérdida de agua (PH _t)	$PH = -477.805 + 5.474A + 19.361B - 290.312C$ $- 3.358D - 0.208AB + 1.870AC + 0.020AD$ $+ 4.615BC + 0.059BD + 6.955CD - 0.016A^2$ $- 0.189B^2 + 2.192C^2 - 2.919 \times 10^{-3}D^2 - 0.030ABC$ $- 2.978 \times 10^{-4}ABD - 0.043ACD - 0.114BCD$ $+ 5.884 \times 10^{-4}A^2B - 1.372 \times 10^{-4}A^2C - 3.70 \times 10^{-6}A^2D$ $+ 1.932 \times 10^{-3}AB^2 + 7.006 \times 10^{-4}ABCD$ $- 5.173 \times 10^{-6}A^2B^2$

A = Tiempo (min), B = Concentración (°Brix), C = Relación Fruta:Solución (g/g),

D = Temperatura (°C)

Fuente: Elaboración propia (2009)

Como se observa en el cuadro 4.7, las ecuaciones tienen coeficientes, para determinar si estos son significativos o no, se realizó una prueba de ajuste o llamada prueba de significancia. El cual permitió determinar que coeficientes son o no importantes o significantes.

Después de obtener los modelos de regresión ajustados, se procedió a analizar si los datos reales con respecto a los calculados de acuerdo al modelo de regresión, son validos. Para este fin se procedió a realizar el análisis de varianza a cada modelo de regresión ajustado, correspondiente a los resultados experimentales de la Ganancia de sólidos y Perdida de agua, además se muestran los promedios de las respuestas, el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de variación (C.V) y la desviación normal de la regresión, correspondiente a la Ganancia de sólidos y Perdida de agua.

Cuadro 4.8. Análisis de Varianza para el Modelo Ajustado Correspondiente a los Resultados de la Perdida de Agua en el Proceso de DO de la Carambola (*Averrhoa carambola L.*) Variedad Acida.

Promedio de respuestas: 5.28 R^2 : 0.95
Desviación Normal: 0.32 Coeficiente de Variación (CV%): 6.08

ANALISIS DE VARIANZA					
FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADO MEDIO	F_c	F_t
Modelo	30.77	11	2.80	27.065	< 0.0001
Residuo	1.55	15	0.10		
Falta de ajuste	1.31	13	0.10	0.85	0.66
Error puro	0.24	2	0.12		
Total	32.32	26			

Fuente: Elaboración propia (2009)

Cuadro 4.9. Valores mas adecuados para las Variables Independientes en el Proceso de Deshidratación Osmótica de la carambola (*Averrhoa carambola L.*) variedad acida.

FACTOR	NOMBRES	VALOR
A	Tiempo	150 min
B	Concentración de Solución	65 °Brix
C	Relación Fruta/Solución	1:4 g/g
D	Temperatura	52 °C

Fuente: Elaboración propia (2009)

Cuadro 4.10. Valores Máximos y Mínimos de las Variables Respuesta o Dependientes Obtenidos del Proceso de Deshidratación Osmótica de la carambola (*Averrhoa carambola* L.) variedad acida.

NIVEL	GANANCIA DE SÓLIDOS (g/g)	PÉRDIDA DE AGUA (g/g)
Máximo	3.42	6.79
Mínimo	0.87	2.79

Fuente: Elaboración propia (2009)

Para el análisis estadístico de los valores obtenidos experimentalmente se utilizó el paquete estadístico DESIGN-EXPERT Plus versión 8.0; con el cual se obtuvo los valores de las variables respuestas; Ganancia de sólidos (GS) y Perdida de agua (PH) mas significativas del proceso (ver cuadro 4.10), en función de las variables de entrada: tiempo (A), concentración de solución (B), relación F:S (C) y temperatura (D), mediante graficas de superficie de respuesta y modelos matemáticos obtenidos.

4.3.5 Correlación de la transferencia de sacarosa utilizando diseños experimentales

4.3.5.1 Superficie de respuesta

Mediante el uso de las graficas de superficie de respuesta y de contorno, podemos visualizar los efectos de las variables independientes (tiempo (A), concentración de solución (B), relación F:S (C) y temperatura (D)), sobre las respuestas; Ganancia de sólidos (GS) y Perdida de agua (PH).

En las figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 se muestran las graficas de superficie de respuesta y contorno para Ganancia de sólidos; las cuales ilustran la función objetivo, minimizar la ganancia de sólidos es decir la menor cantidad de azúcar que ingresa a la matriz del fruto de la carambola y mayor cantidad de agua que abandona el fruto debido a la presión osmótica que ejerce la solución. Luego los datos experimentales se ajustaron a un modelo polinomial como se indica en las ecuaciones que contiene el cuadro 4.7, teniendo como resultado los valores de las variables independientes a las condiciones mas adecuadas para el proceso de DO que se muestran en el cuadro 4.9.

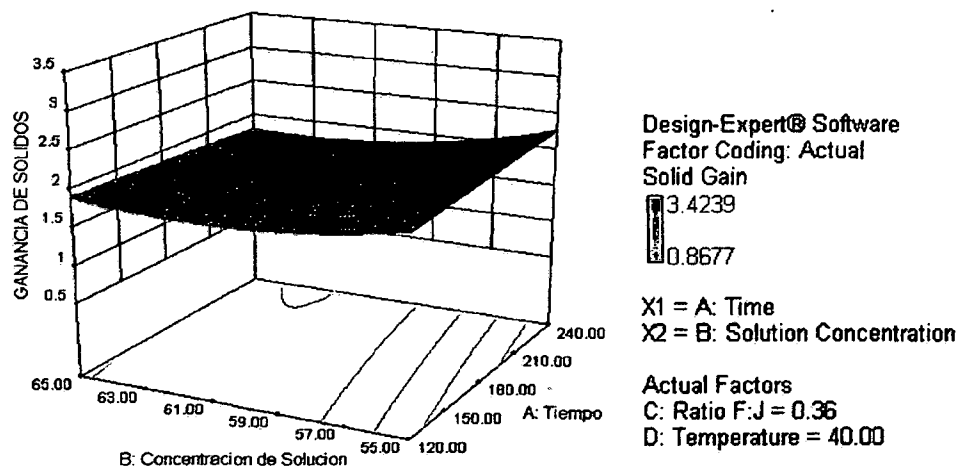


Figura 4.6. Grafica de superficie de respuesta y contorno para la ganancia de sólidos durante la DO de la carambola (*Averrhoa carambola* L.), en función del tiempo y concentración de la solución.

Fuente: Elaboración Propia (2010)

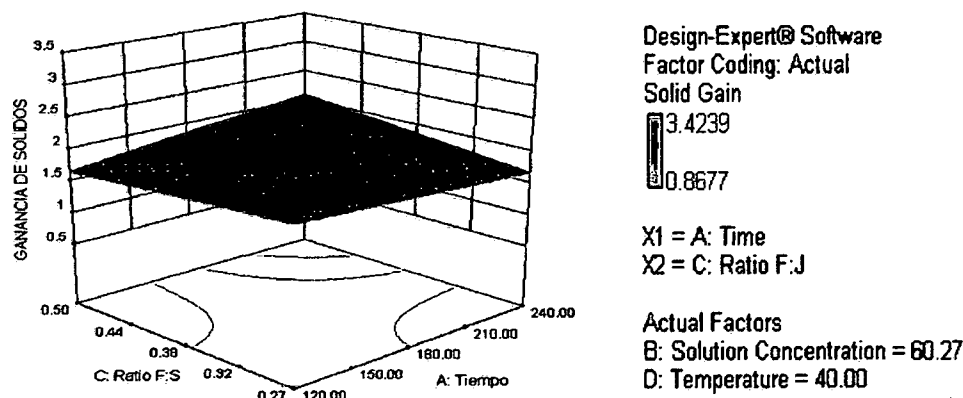


Figura 4.7. Grafica de superficie de respuesta y contorno para la ganancia de sólidos durante la DO de la carambola (*Averrhoa carambola* L.), en función a la relación fruta:solución con el tiempo.

Fuente: Elaboración Propia (2010)

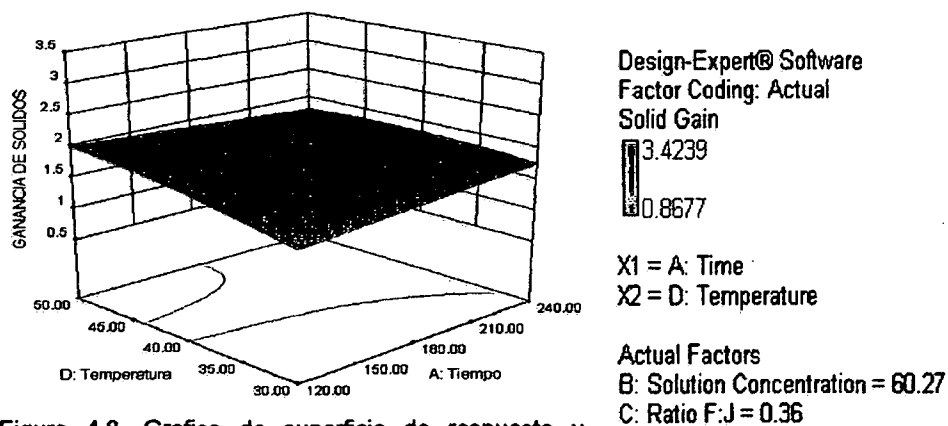


Figura 4.8. Grafica de superficie de respuesta y contorno para la ganancia de sólidos durante la DO de la carambola (*Averrhoa carambola* L.), en función del tiempo y temperatura.

Fuente: Elaboración Propia (2010)

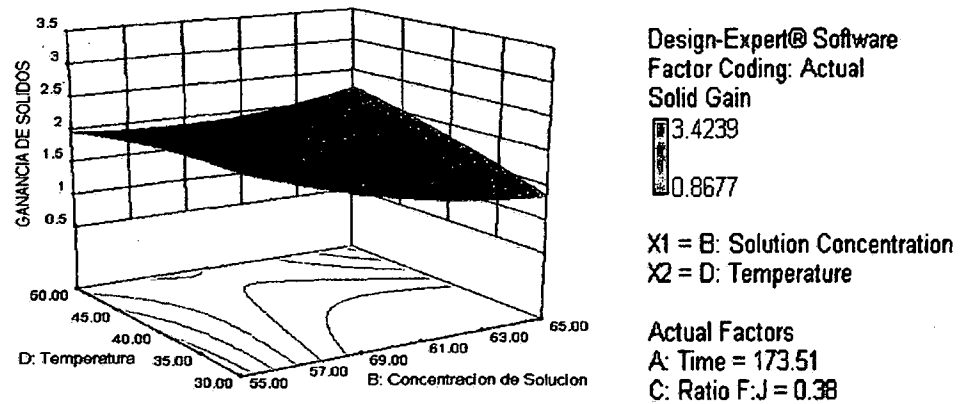


Figura 4.9 Grafica de superficie de respuesta y contorno para la ganancia de sólidos durante la DO de la carambola (*Averrhoa carambola L.*), en función a la concentración de la solución Vs. Temperatura.
Fuente: Elaboración Propia (2010)

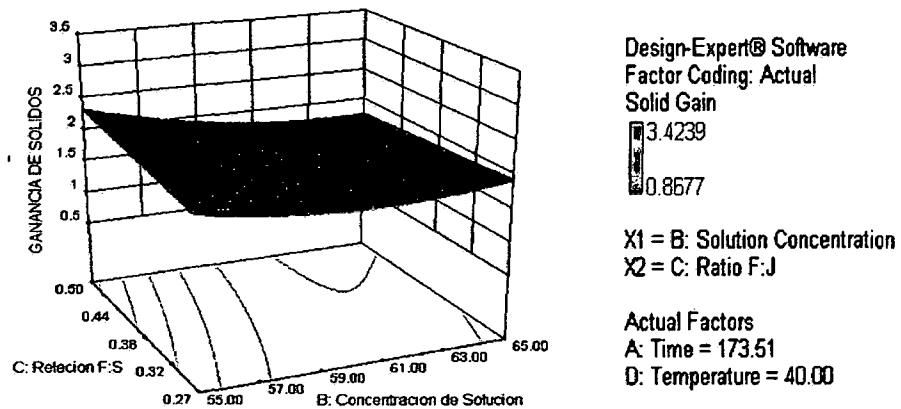


Figura 4.10. Grafica de superficie de respuesta y contorno para la Ganancia de sólidos durante la DO de la carambola (*Averrhoa carambola L.*), en función de relación fruta:solución y concentración de la solución.
Fuente: Elaboración Propia (2010)

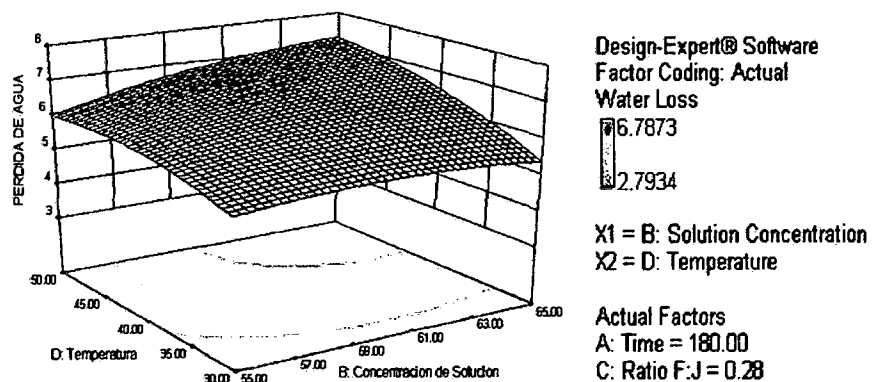


Figura 4.11. Grafica de superficie de respuesta y contorno para la Perdida de Agua durante la DO de la carambola (*Averrhoa carambola L.*), en función de la temperatura y concentración de la solución.
Fuente: Elaboración Propia (2010)

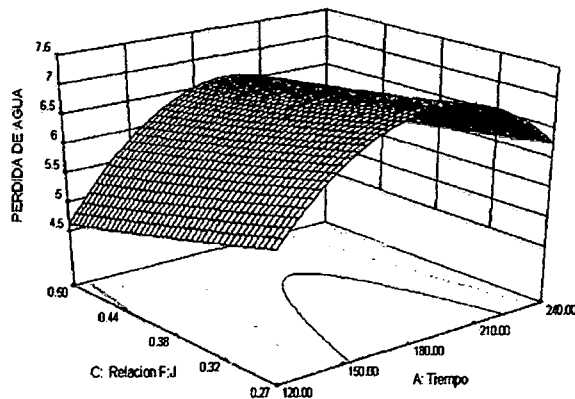


Figura 4.12. Grafica de superficie de respuesta y contorno para la Perdida de Agua durante la DO de la carambola (*Averrhoa carambola* L.), en función a relación fruta:solución y tiempo.
Fuente: Elaboración Propia (2010).

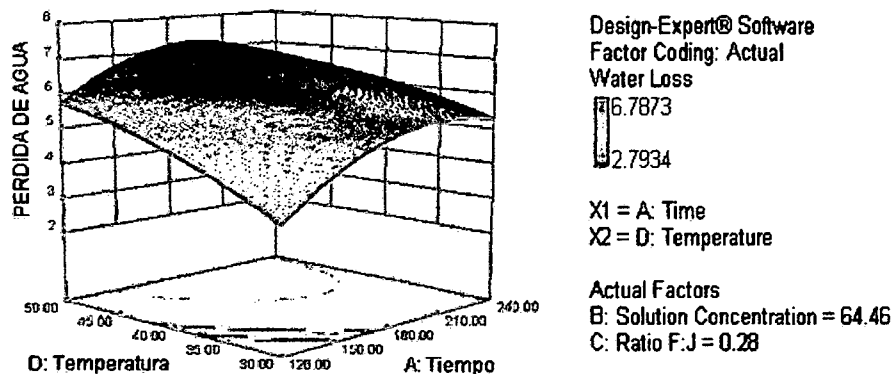


Figura 4.13. Grafica de superficie de respuesta y contorno para la Perdida de Agua durante la DO de la carambola (*Averrhoa carambola* L.), en función de la temperatura Vs. Tiempo.
Fuente: Elaboración Propia (2010)

4.3.5.2 Efecto del tiempo de transferencia de sacarosa

La pérdida de agua y ganancia de sólidos a partir de los cubos de carambola con respecto al tiempo de DO se puede observar desde las figuras 4.14 al 4.18 en concentraciones de azúcar y temperaturas de operación diferentes. Así como la pérdida de humedad y ganancia de sólidos de forma no lineal con el tiempo en todas las concentraciones y temperaturas.

Tanto la pérdida de humedad como la ganancia de sólidos fueron más rápidas en el período inicial de ósmosis y va disminuyendo al incrementar el tiempo, esto era de esperarse debido a los potenciales osmóticos de conducción de la humedad; así como la transferencia de sólidos seguirá disminuyendo con el tiempo ya que la humedad de la muestra sigue moviendo a la solución y el sólido de la solución a la muestra. Además, la

captación progresiva de sólidos daría lugar a la formación de una capa interna de sólidos, que puedan interferir con los gradientes de concentración a través de la interfaz de fruta-solución y actuaría como una barrera contra la pérdida de agua y de residuos sólidos (Hawkes y Flink, 1978).

Además, la rápida pérdida de agua y de residuos sólidos cerca de la superficie en un inicio puede provocar cambios estructurales que conducen a la compactación de las capas superficiales y resistencia al aumento de la transferencia de masa de agua y sólidos (Lenart y Flink, 1984). Tendencias similares se han reportado para otras frutas y verduras durante la ósmosis (Ertekin y Cakaloz, 1996; Karthanos et al., 1995). El análisis de varianza para el efecto de diferentes intervalos de tiempo (120-300 min) sobre la transferencia de masa ha demostrado una alta diferencia significativa en la pérdida de humedad y ganancia de sólidos en todas las combinaciones de temperatura, relación fruta: solución y concentración. Los p-valores calculados en todas las combinaciones de temperatura y concentración fueron menores a 0.05.

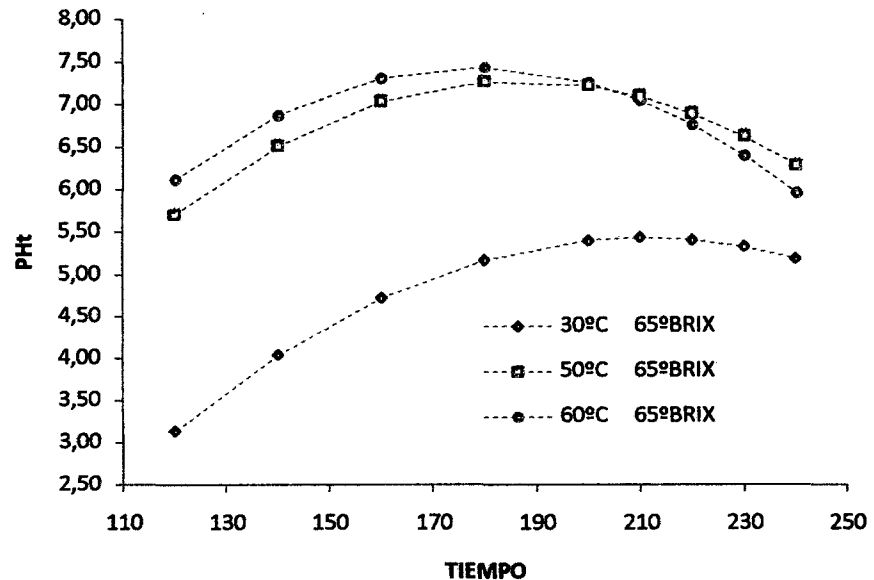


Figura 4.14: Efecto de la temperatura de osmosis sobre la pérdida de humedad a una concentración de azúcar constante (65°Brix).

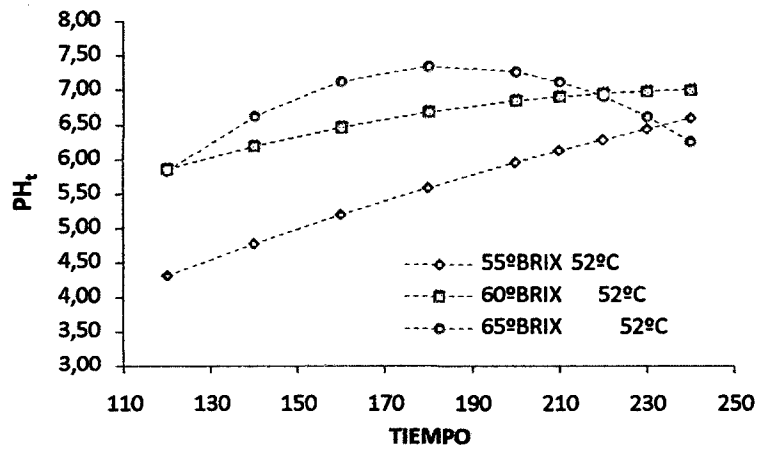


Figura 4.15. Efecto de la concentración de la solución osmótica sobre la pérdida de humedad a una temperatura constante (52°C).

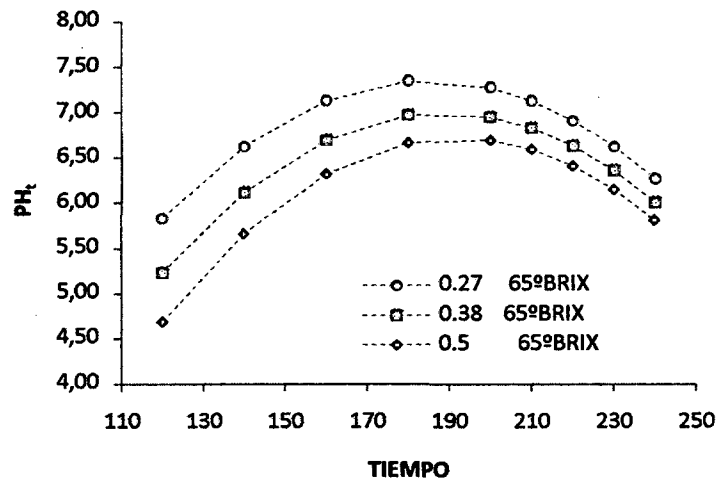


Figura 4.16. Efecto de la relación fruta: solución osmótica sobre la pérdida de humedad a una concentración de azúcar constante (65°Brix).

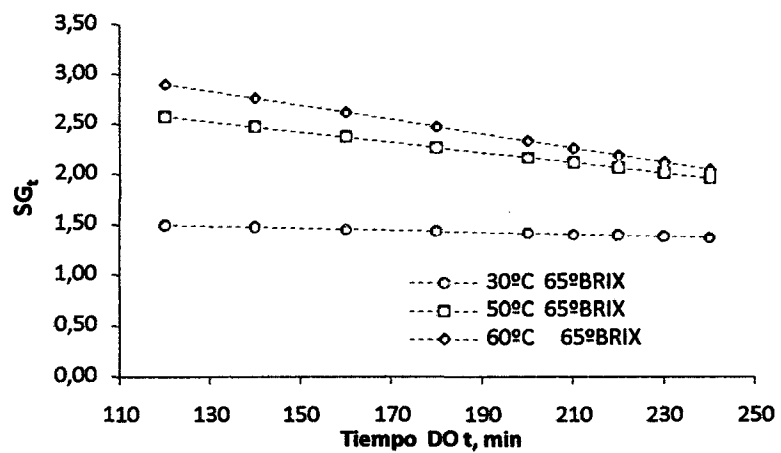


Figura 4.17. Efecto de la temperatura de la solución osmótica sobre la ganancia de sólidos en la concentración de azúcar constante (65°Brix).

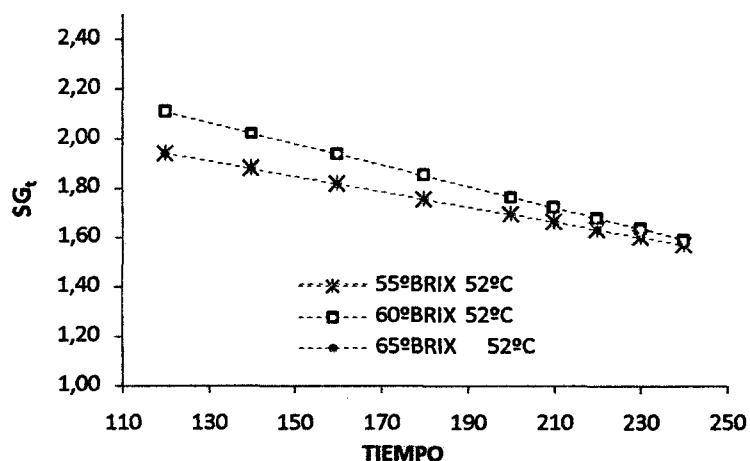


Figura 4.18. Efecto de la Concentración de la Solución Osmótica sobre la ganancia de sólidos a una temperatura constante (52°C).

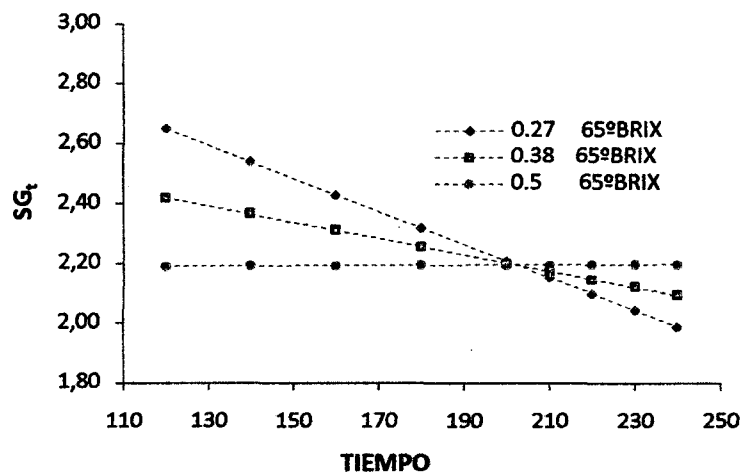


Figura 4.19. Efecto de la relación fruta:solución osmótica sobre la ganancia de sólidos en la concentración de azúcar constante (65°Brix).

4.3.6 Modelamiento Matemático Basado en Leyes Fundamentales para la Velocidad de Transferencia de Sacarosa.

Para la predicción de la cinética de deshidratación osmótica durante el proceso, así como para determinar el punto de equilibrio final, se utilizó una ecuación de dos parámetros basados en el balance de masa total y por componentes correlacionados por el modelo planteado por, Azuara et al. (1992).

A una concentración inicial y temperatura constante, la ganancia de sólidos y la pérdida de humedad están dadas por las ecuaciones. (4.1-1) y (4.2-1). En las ecuaciones. (4.1-1) y (4.2-1), $\frac{1}{s_1}$, y $\frac{1}{s_2}$ representan el tiempo requerido para la

mitad de la materia difusible (agua o sólidos) para difundir hacia fuera o entrar en el producto, respectivamente. Además, como el tiempo, se convierte en t mucho mayor que los valores de $\frac{1}{S_1}$ y $\frac{1}{S_2}$ (es decir, $t \rightarrow \infty$), la pérdida de agua o la ganancia de sólidos, PH_t o GS_t , enfoques valor de equilibrio, PH_∞ o GS_∞ , asintóticamente.

En las ecuaciones (4.1-1) y (4.2-1), los valores de los parámetros S_1 , PH_∞ , S_2 y GS_∞ , puede estimarse a partir de corta duración osmótica datos cinéticos mediante la realización de regresión lineal en o mediante la representación gráfica de las ecuaciones. (4.1-1) y (4.2-1) en forma lineal. Las graficas en forma lineal de las ecuaciones para diferentes concentraciones de azúcar y las temperaturas de la solución osmótica se muestran en las Figuras 4.19 – 4.21. Así que, si las graficas de los datos experimentales de $\frac{t}{PH_t}$ vs. t y $\frac{t}{GS_t}$ vs t a demostrar la linealidad, los valores del parámetro puede determinarse a partir de la intercepción y la pendiente utilizando las ecuaciones. (4.1-2) y (4.2-2). El modelo, las ecuaciones. (4.1-1) y (4.2-1) podría ser utilizado para predecir la cinética transferencia de masa.

Los valores de $\frac{t}{PH_t}$ y $\frac{t}{GS_t}$, determinado por la pérdida de humedad y sólidos datos de ganancia a diferentes concentraciones de azúcar y las temperaturas fueron graficados contra el tiempo. Una tendencia lineal se observó en todos los casos. Las líneas rectas se, por lo tanto, provista mediante la realización de regresión lineal y los valores de los parámetros se determinaron. Los valores de parámetros S_1 , PH_∞ , y la cinética de la pérdida de agua (Ecuación (4.1-1)) y de S_2 y GS_∞ de la cinética de ganancia de sólidos (Ecuación (4.2-1)) figuran en el cuadro 4.10.

La determinación de los valores del coeficiente estuvo en el rango de 0.994-0.999 mostrando un buen ajuste del modelo propuesto en su forma lineal a los datos experimentales en todos los casos. La falta de prueba de ajuste aplicado a los datos replicados mostró que los modelos son adecuados para describir la pérdida de agua y ganancia de sólidos en los cubos de carambola.

Los valores de la estadística de L que se calcularon sobre la base del modelo de estimadores independientes y dependientes de los residuales desviaciones estándar, tanto para la pérdida de agua y ganancia de sólidos fueron 6.79 y 3.42, respectivamente, al 5 por ciento el nivel de significación. Los valores de L fueron

menores que el valor extremo superior de corte 6.09 obtenidos a partir de la distribución F, que mostró que los modelos son adecuados para describir la transferencia de masa en todas las combinaciones de temperatura, relación fruta:solución de sacarosa y concentración. Los p-valores calculados para mostrar el efecto del tiempo sobre la transferencia de masa fueron también inferiores a 0.05 en todas las combinaciones.

$$PH_t = \frac{S_1(PH_{\infty})}{1+S_1 t} = \frac{t(PH_{\infty})}{\frac{1}{S_1}+t} \quad (4.1-1)$$

$$\frac{t}{PH_t} = \frac{1}{S_1(PH_{\infty})} + \frac{t}{PH_{\infty}} \quad (4.1-2)$$

$$GS_t = \frac{S_2 t(GS_{\infty})}{1+S_2 t} = \frac{t(GS_{\infty})}{\frac{1}{S_2}+t} \quad (4.2-1)$$

$$\frac{t}{GS_t} = \frac{1}{S_2(GS_{\infty})} + \frac{t}{GS_{\infty}} \quad (4.2-2)$$

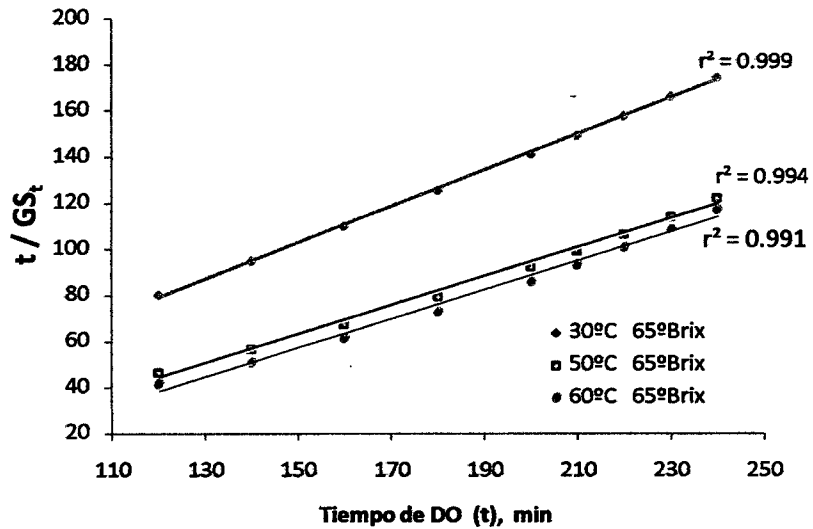


Figura 4.20. Grafico de Linealización de los datos según el modelo de Azuara et al, para la determinación de GS_{∞} y S_2 a una concentración de azúcar de 65°Brix y diferentes temperaturas.

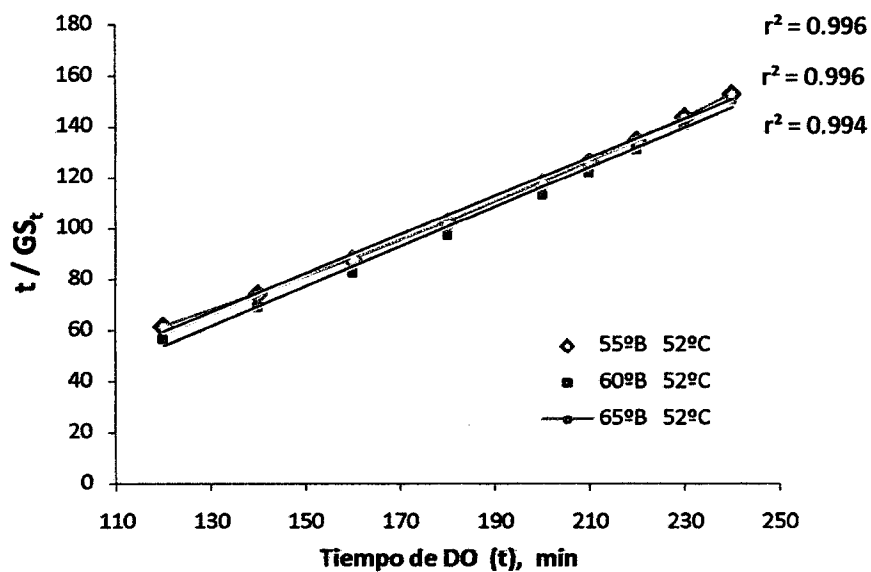


Figura 4.21. Grafico de Linealización de los datos según el modelo de Azuara et al, para la determinación de GS_{∞} y S_2 a una temperatura constante de 52°C y diferentes concentraciones.

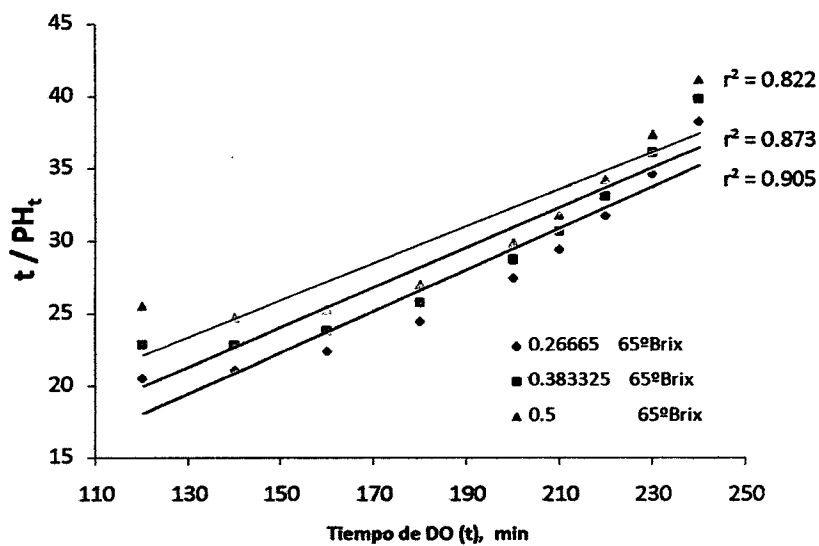


Figura 4.22. Grafico de Linealización de los datos según el modelo de Azuara et al, para la determinación de PH_{∞} y S_1 a una concentración de azúcar de 65°Brix y diferentes relaciones de fruta: solución osmótica.

Cuadro 4.11. Valores de las Variables Dependientes Calculadas a partir de las graficas de Linealización mediante el Modelo de Azuara et al para el Proceso de Deshidratación Osmótica de la carambola (*Averrhoa carambola* L.) variedad acida.

VARIABLES DE OPERACION	VARIABLES RESPUESTAS EN EL EQUILIBRIO		DIFUSIVIDAD	
	GS _∞	PH _∞	S ₁	S ₂
55 °Brix	1.32	14.08	0.004	-0.02
60 °Brix	1.28	8.77	0.02	-0.02
65 °Brix	1.32	6.99	0.17	-0.02
1:4 g/g	1.59	6.99	0.17	-0.02
3:8 g/g	1.84	7.30	0.04	-0.03
1:2 g/g	2.20	7.81	0.02	1.43
30 °C	1.27	13.72	0.003	-0.05
50 °C	1.58	7.19	0.08	-0.02
60 °C	1.58	6.06	-0.05	-0.02

En el cuadro 4.10 se muestran los valores representados en las graficas de linealización de los datos experimentales (ecuaciones 4.1-2 y 4.2-2) para determinación del coeficiente de difusividad tanto para ganancia de sólidos y perdida de agua durante el proceso de DO del fruto de la carambola (*Averrhoa carambola* L.) variedad ácida.

Cuadro 4.12. Parámetros de Ajuste Linealizado de las Variables Dependientes Obtenidos en el Proceso de Deshidratación Osmótica de la carambola (*Averrhoa carambola* L.) variedad acida.

VARIABLES DE OPERACION	GANANCIA DE SOLIDOS			PERDIDA DE AGUA		
	$\frac{1}{GS_{\infty}}$	$\frac{1}{S_2 GS_{\infty}}$	R ²	$\frac{1}{PH_{\infty}}$	$\frac{1}{S_1 PH_{\infty}}$	R ²
30 °C	0.79	-15.53	1.00	0.07	24.79	0.54
50 °C	0.63	-31.84	1.00	0.14	1.83	0.91
60 °C	0.63	-37.94	0.99	0.17	-3.08	0.90
55 °Brix	0.76	-31.71	1.00	0.07	19.30	1.00
60 °Brix	0.78	-40.21	0.99	0.11	6.58	1.00
65 °Brix	0.76	-31.71	1.00	0.14	0.82	0.91
1:4 g/g	0.63	-32.93	0.99	0.14	0.82	0.91
3:8 g/g	0.54	-16.87	1.00	0.14	3.42	0.87
1:2 g/g	0.45	0.32	1.00	0.13	6.70	0.82

4.3.6.1 Efecto de la concentración y la temperatura sobre la transferencia de masa

Se puede observar en las figuras 4.16 y 4.18 que tanto la pérdida de agua y la ganancia de sólidos por los cubos de carambola aumentó con el incremento en concentración de la solución osmótica (50-70 °Brix) a temperatura constante de solución. Esto era de esperarse debido a los potenciales osmóticos de conducción de agua, así como de sólidos aumentaría con la mayor concentración de azúcar en la solución osmótica. Estos efectos también se han reportado en otras frutas y hortalizas (Ertekin & Cakaloz, 1996; Pokharkar & Prasad, 1998). El análisis de varianza mostró que la concentración de la solución osmótica afecta significativamente la pérdida de agua y ganancia de sólidos en un 5% nivel de significancia.

También se observó a partir de las figuras. 4.12 y 4.21 que tanto la pérdida de agua y la ganancia de sólidos por los cubos de carambola aumentó con la temperatura de la solución osmótica de 20 a 60°C. Aumento de la transferencia de masa debido al aumento en los resultados de temperatura de la solución, porque parece una temperatura más alta para acelerar su pérdida de agua por la hinchazón y la plastificación de las membranas celulares, más rápida difusión del agua en el producto y mejores características de transferencia de agua en la superficie del producto debido a la menor viscosidad del medio osmótico.

Además, el aumento de ganancia de sólidos a temperaturas más altas puede ser debido a la destrucción de la estructura de la membrana celular (Le Maguer, 1988). Resultados similares han sido reportados por Lazarides et al. (1995) con deshidratación osmótica de láminas de manzana en un rango de temperatura de 20-50°C. El efecto de la temperatura de la solución osmótica fue considerado en el análisis de varianza. La temperatura de la solución osmótica se encontró que afecta de forma significativa en la pérdida de humedad y mostró el efecto no significativo sobre la ganancia de sólidos en un 5% nivel de significancia.

El aumento en la pérdida de humedad en equilibrio, así como la ganancia de sólidos en equilibrio, se analizó con el aumento en la concentración de

azúcar y la temperatura calculando sus valores por relaciones logarítmicas. Los valores para la pérdida de humedad y ganancia de sólidos en equilibrio esta dada por las ecuaciones (4.1-2) y (4.2-2) fueron 6.06 - 14.08 y 1.27 - 2.2 respectivamente. Las cuales predicen los puntos de equilibrio en cualquier concentración y la temperatura de la solución osmótica en otras condiciones constantes utilizados en este experimento.

V. CONCLUSIONES

- 5.1 La correlación de los datos de transferencia de sacarosa durante la DO del fruto de la Carambola (*Averrhoa carambola* L.), con el diseño experimental compuesto central permite obtener una pérdida de agua de 3.15 a 6.65 g de agua y una ganancia de sólidos de 0.87 a 3.42 g de sólidos con un ajuste de R^2 de 0.994-0.99.
- 5.2 Las superficies de respuesta y graficas de contorno permiten analizar los efectos de las variables independientes en la ganancia de sólidos y pérdida de agua durante la DO del fruto de la carambola (*Averrhoa carambola* L.) cortado en forma de cubos, facilitando la determinación de los valores mas adecuados de las variables respuestas (mayor pérdida de agua y un moderado incremento de sólidos en la fruta), tiempo (150 min), Concentración de solución (65 °Brix), Relación fruta: solución (1:4 g/g) y Temperatura (52 °C); obteniendo una ganancia de sólidos de 3.42 - 0.87 g/g, y pérdida de agua con valores de 6.79 - 2.79 g/g.
- 5.3 Al someter el fruto de la carambola (*Averrhoa carambola* L.), variedad acida a un proceso de DO se produce un fenómeno de transferencia de masa simultáneo y en contracorriente, la salida de agua de la fruta hacia la solución y el incremento o entrada de sólidos solubles a la matriz sólida.
- 5.4 El modelo matemático utilizado para describir el proceso de difusión es consistente con los valores experimentales de pérdida de agua y sólidos solubles ganados y basado en leyes fundamentales.
- 5.5 De la correlación de los datos experimentales a los modelos derivados de leyes fundamentales, se determinó un ajuste del 82 al 99% y nivel de significancia de 95% en la Transferencia de Sacarosa durante el proceso de DO del Fruto de la Carambola (*Averrhoa carambola* L.); el análisis de varianza para cada modelo de regresión ajustada adecuadamente a los datos experimentales, tal como se visualiza en las graficas correspondientes para la ganancia de sólidos y pérdida de agua, estableciéndose que la temperatura y el tiempo fueron las variables mas influyentes en el proceso de DO.
- 5.6 De los resultados experimentales se concluye que lo dos parámetros desarrollados por el modelo matemático describe de manera satisfactoria la cinética de transferencia de masa en el proceso de DO de los cubos de carambola. El modelo predice los puntos de equilibrio sobre la base del tiempo de duración del tratamiento osmótico. La pérdida de humedad de equilibrio PH_{∞} , así como el equilibrio de la

ganancia de sólidos GS_{∞} según el modelo propuesto muestra la relación logarítmica con el aumento en la concentración de la solución de azúcar y la temperatura.

- 5.7 Del modelo desarrollado se establecen que el valor de la constante de difusión del agua S_1 es de 0.004 - 0.17 para la relación de concentración de la solución y de 0.17 a 0.02 para la relación de fruta: solución saturada así mismo para la temperatura es 0.003 a -0.05. Para la ganancia de sólidos S_2 presento valores de -0.02 constantes para la relación a diferentes concentraciones de la solución y de 1.59 a 2.20 para la relación de fruta: solución saturada y por ultimo la temperatura de 1.27 a 1.58. Los valores de R^2 presentaron una variabilidad de 0.84 a 0.99 demostrándose el buen ajuste de los datos experimentales.
- 5.8 De los resultados experimentales podemos concluir que los dos parámetros S_1 , PH_{∞} , y S_2 , GS_{∞} del modelo desarrollado, describen la transferencia de sacarosa en el proceso de DO de cubos de carambola (*Averrhoa carambola* L.) a cualquier tiempo de manera satisfactoria cuando las demás condiciones de proceso se mantienen constantes. El modelo puede predecir los puntos de equilibrio a diferentes tiempos de DO.

VI. RECOMENDACIONES

- 6.1 Realizar estudios sobre el índice de madurez de la carambola (*Averrhoa carambola* L.) variedad acida, desde su cosecha hasta el almacenamiento.
- 6.2 Desarrollar trabajos que conlleven al análisis de la pérdida de agua y ganancia de sólidos de frutas y vegetales utilizando el microscópico electrónico de barrido.
- 6.3 Realizar estudios similares con otras variedades de frutas de la región como la papaya, cocona, y naranja.
- 6.4 Realizar más trabajos experimentales para ampliar la aplicabilidad del modelo y poder analizar la estructura microscópica de correlacionar la porosidad, con los patrones de contracción del tejido de la fruta con las observaciones macroscópicas de pérdida de agua y ganancia de sólidos.

VII. BIBLIOGRAFIA

1. AZUARA, E., CORTES, R., GARCIA, H. S., & BERTIAN, C. I. (1992). Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law. *International Journal of Food Science and Technology*, 27, 239–242.
2. BARAT, J. M. 1998. Desarrollo de un Modelo de la Deshidratación Osmótica como Operación Básica. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
3. BARBOSA, G. y VEGA, H. 2000. Deshidratación de Alimentos. Zaragoza - España: Acribia S.A., Pág. 235-253.
4. CALZADA, B. 1980. "143 Frutales Nativos". Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima – Perú. Ed. Agraria.
5. CASTILLO, M., CORNEJO, F., Estudio del Efecto del Proceso de Deshidratación Osmótica en la Obtención de Trozos Secos de Carambola (*Averrhoa carambola* L.). Revista Tecnológica ESPOL. Vol. 20, N° 1, 183-188, 2007. Guayaquil-Ecuador. mcastill@espol.edu.ec, fcomejo@espol.edu.ec
6. CHENLO, F.; MOREIRA, R; FERNÁNDEZ-HERRERO, C; VÁZQUEZ, G. Osmotic dehydration of chestnut with sucrose: Mass transfer processes and global kinetics modeling. *Journal of Food Engineering* 78 (2007) 765 –774. 2005.
7. CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS. Deshidratación osmótica de la papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*) e influencia de la temperatura y concentración de la solución sobre la cinética de transferencia de materia. Vol.27 N° 3 Campinas. 2007.
8. CODEX STAN 187. 1993. Norma del Codex para la Carambola. Páginas del 1 al 6.
9. CORZO y CENTENO. Superficie de respuesta de la transferencia de masa durante la D.O del melón (*Cucumis melo*), variedad Edisto. Art. De la Revista de la Facultad de Farmacia. Universidad de Colombia. Vol. 45. 2003.
10. CRANK, J. (1975). The mathematics of diffusion. Oxford. Clarendon Press.
11. DAVILA L. y LOPEZ L. Transferencia de Masa de la Deshidratación Osmótica a Vacío de Rodajas de *Ananas comosus* L. Merr. Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial Piña. 2005.
12. DICCIONARIO DE INGENIERIA. Cultural S.A. Madrid – España. Edición 2000.

13. EREN, I.; KAYMAK-ERTEKIN, EGE. Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 79 (2007) 344–352.
14. FITO, P.J.; ALBORS, A. Mass transfer Phenomena During the Osmotic Dehydration of apple isolated protoplasts (*Malus domestica* var. Fuji). *Journal of Food Engineering* 77 (2006) 179–187.
15. FLORES PAYTAN. S. 1997. Cultivo de Frutales Nativos Amazónicos. Tratado de cooperación amazónica. Secretaria Pro – Tempore. Lima, Enero.
16. GEANKOPLIS CH. J. 1998. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias University of Minnesota. Tercera Edición México, 1998 Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. México.
17. GÓMEZ, E; CORZO, O; BRACHO, N y MOINO, A. 2003. Optimización de la Deshidratación Osmótica del Melón utilizando la Metodología de la Superficie de Respuesta Estadística. 27 Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa. Estado Nueva Esparta – Venezuela.
18. GONZÁLEZ D.; HERNÁNDEZ M. Desarrollo del Fruto e Índices de cosecha de la carambola (*Averrhoa carambola* L.) producida en el Piedemonte Amazónico Colombiano. Vol. 18, N° 01-03. 2001. Pág. 53-62. Colombia.
19. HOUGH. G.; CHIRIFE, J.; MARINI, C. 1993. A Simple Method for Osmotic Dehydration of Apples. *Lebensm. Wiss. Technol.* 26(2): p. 151 – 156.
20. HUAYAMAVE E, MSc. CORNEJO F. 2005. Influencia de Presiones de Vacío en la Transferencia de Masa Durante la Deshidratación Osmótica del Mango. Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción. Guayaquil-Ecuador. *Revista Tecnología ESPOL*, Vol. 18.
21. JOHNSON, R; KUBY, P. 1999. Estadística Elemental lo Esencial. Internacional Thomson Editores, S.A. 2º Edición.
22. KHIN M. M., ZHOU W.; PERERA, C. O. A Study of the Mass Transfer in Osmotic Dehydration of Coated Potato Cubes. *Journal of Food Engineering* 77. (2006). 84–95.
23. GIRALDO, G, TALENS, P. FITO, P., CHIRALT, A. 2003. Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of Food Engineering* 58, 33-43.

24. LE MAGUER, M. (1988). Osmotic Dehydration: Review and Future Directions. In: Proceedings of the International Symposium on Progress in Food Preservation Processes (pp. 283–309), Ceria, Brussels, Belgium.
25. LENART, A. (1992). Mathematical Modelling of Osmotic Dehydration of Apple and Carrot. *Pol. J. Food Nutr. Sci.*, 1 (42): p. 33–44.
26. LENART, A.; & FLINK, J. M. (1984). Osmotic concentration of potato. I. Criteria for the end point of the osmosis process. *Journal of Food Technology* (19), 45–63, II. Criteria for the end point of the osmosis process. *Journal of Food Technology*, 19, 65–89.
27. MAGEE, T.R.A., HASSABALLAH, A. A., Murphy, W. R. (1983). Internal mass Transfer During Osmotic Dehydration of Apple Slices in Sugar Solutions. *J. Food Sci. Technol.* p. 147- 155.
28. MAZZANT, G. 2000. Analysis of mass transfer in osmotic dehydration of apples. A. Thesis Presented to The Faculty of Graduate Studies of The University of Guelph In partial fulfilment of requirements for the degree of Mater of Science.
29. MTUSEK A. AND MERESZ P. 2003. Modelling of Sugar Transfer during Osmotic Dehydration of Carrots. Department of Biochemistry and Food Technology.
30. MYA MYA KHIN, WEIBIAO ZHOU, SHI YUN YEO. (2006). Mass Transfer in the Osmotic dehydration of Coated Apple Cubes by Using maltodextrin as the Coating Material and their Textural Properties Food Science and Technology Programme, Department of Chemistry, National University of Singapore, 3 Science Drive 3.
31. NOBEL, P. S. (1983) *Biophysical Plant Physiology and Ecology*. W. H. Freeman and Company.
32. NOVILLO, G. 2009. Desarrollo y Evaluación Física, Química y Sensorial de Jugo de dos variedades de carambola (*Averrhoa carambola*). Proyecto de graduación del Programa de Ingeniería en Agroindustria Alimentaria, Escuela Agrícola Panamericana “Zamorano”, Honduras. 26p.
33. OCHOA C.I., AYALA A. Modelos Matemáticos de Transferencia De Masa En Deshidratación Osmótica. *Ciencia y tecnología alimentaria: Revista de la Asociación de Licenciados en Ciencia y Tecnología de los Alimentos de Galicia*, ISSN 1135-8122, Vol. 4, Nº. 5, 2005, pág. 330-342.
34. PALOU, E., LOPEZ-MALO, A., ARGAIZ, A., WELTI, J. 1994 the use of Peleg's equation to model osmotic concentration of papaya. *Drying Technology*, 965-978.

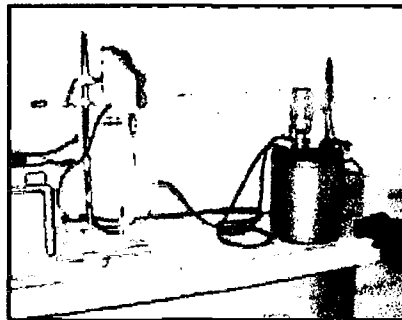
35. PINZÓN, M. I; LEÓN G., A.; MEJÍA, P. 2005. Efecto de los Tratamientos Osmóticos sobre el color y la Actividad Enzimática en Rodajas de Carambolo (*Averrhoa carambola* L.). Laboratorio de Investigaciones en Postcosecha. Universidad del Quindío. A.A. 460. Armenia, Quindío. COLOMBIA.
36. PINZÓN, M. I; ROJAS, A. Cinética de Deshidratación Osmótica de Carambolo, *Averrhoa carambola* L. Laboratorio de Investigaciones en Postcosecha. Universidad del Quindío. Calle 12N Carrera 15, Armenia (Colombia). E-mail: postcosecha@uniquindio.edu.com
37. 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, 452-459.
38. QI, H. & LE MAGUER, M. (1989) Osmotic study of carrot cubes in a continuous countercurrent process. In Proc. Fifth Int. congress Eng. And Food (ICEF 5). Cologne. Germany, p. 177
39. QI, H. (1989). A study of the process parameters of a continuous contactor for osmotic treatment. M. S. Thesis, University of Alberta, Edmonton. AB, Canada.
40. RAOULT-WACK A. L., JOURDAIN, P., GUILBERT, S., RIOS. G. (1991). Technique de Fluidisation inverse appliquee aux proceeds de Deshydratation Impregnation par Immersion (DII) in Coll. Resents Progress en Genie des Proceeds, coord. G. Antonini and R. Ben Aim, Techniques et documentation Lavoisier, Paris. 5 (14): 329-334
41. RÍOS P, M.; MÁRQUEZ C., C. Y CIRO V., H. J. 2005. Deshidratación Osmótica de Frutos de Papaya Hawaiana (*Carica papaya* L.) En Cuatro Agentes Edulcorantes. Ingeniera Industrial. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779.
42. RUIZ R. Y., TORRES J. E., CAICEDO L. A, DURÁN H. A, JIMÉNEZ S. A. 2000. Determinación Experimental de la Difusividad Efectiva para la Deshidratación Osmótica de Piña Utilizando Pellets en Forma de Cubos Mediante Métodos Numéricos. Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá. Cll 45 Cra 30- Ciudad Universitaria - Bogotá D.C.- Colombia. E-mail: ruizp@unal.edu.co, lacaicedom@unal.edu.co
43. SAID S.E.H. ELNASHAIE – PARAG GARHYAN. Conservation Equations and modeling of Chemical and Biomechemical Processes. Auburn University. Auburn, Alabama, U.S.A.

44. SALAZAR, M y GUEVARA, A. 1999. Obtención de Carambola (*Averrhoa carambola* L.) Deshidratada por Osmosis. Facultad de Industrias Alimentarias, Universidad Nacional Agraria. La Molina-Lima-Perú
45. SALVATORI, D. M. (1997) Deshidratación Osmótica de Frutas: Cambios Composicionales y Estructurales a Temperaturas Moderadas. Ph. D. Tesis. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia- España
46. SHARMA, S. MULVANEY S. y RIZVI, S. 2003. Ingeniería de Alimentos (Operaciones Unitarias y Practica de Laboratorio), Capitulo 14. Edit. Limusa S.A. México D.F.
47. SINGH B.; PANESAR, P.S. and NANDA, V. 2007. Optimization Of Osmotic Dehydration Process Of Carrot Cubes In Sucrose Solution. Department of Food Engineering and Technology Sant Longowal Institute of Engineering and Technology Longowal (Sangrur) 148106, India Accepted for Publication April 6, 2007
48. SOUZA, S; MEDEIROS M. F.D.; MAGALHAES, M.M.A.; RODRIGUES S.; FERNANDES, F. A. N. Optimization of osmotic dehydration of tomatoes in a ternary system followed by air-drying Josilma. Journal of Food Engineering, 83 (2007) 501–509.
49. SPIAZZI, E. & MASCHERONI, R. (1998) Mass transfer model for osmotic dehydration of fruits and vegetables - I. Development of the Simulation Model. J. Food Eng. 34: 387- 410.
50. SUGARTECH. Sugar Engineers' Library. (En línea). 2005. Disponible en la world wide web: <http://www.sugartech.co.za/>.
51. SUTAR, P.P; GUPTA, D.K. Mathematical modeling of mass transfer in osmotic dehydration of onion slices. Journal of Food Engineering 78 (2007) 90–97.
52. TREYBAL, R. E. (1968) Mass-transfer operations. 2nd ed. McGraw-Hill Book Co. St. Louis.
53. TEPPER M., P. (1996). Transferencia de Masa durante la Deshidratación Osmótica de Palta cv Fuerte. Universidad de Chile Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Escuela de Agronomía. Santiago – Chile.

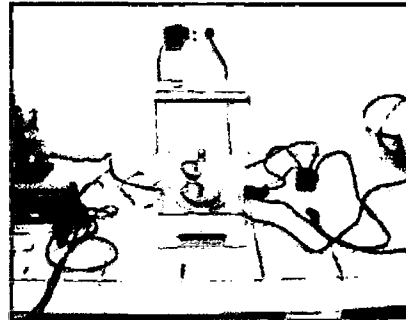
54. SERENO, AM., MOREIRA, R., MARTINEZ, E. 2001. Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt. *Journal of Food Engineering*. 47, 43-49.
55. TASTE PERU SAC. CARAMBOLA. Info@Tasteperu.com.pe. Disponible en la world wide web: <http://www.tasteperu.com.pe/es/index.html>
56. ASPECTOS GENERALES DE LA CARAMBOLA del piedemonte. (en línea). 2008. Disponible en la world wide web:
http://www.agronet.gov.co/www/docs_si2/Aspectosgeneralesdelacarambola.pdf
57. NUTRER S.A DE C.V. Deshidratación Osmótica de Frutas. (En línea, 2009). Disponible: en la world wide web: www.nutrer.com.mx.
58. <http://agronomia.nireblog.com/post/2007/06/22/cultivo-de-carambola-averrhoa-carambola-l>.
59. <http://www.nutricion.pro/16-04-2008/alimentos/propiedades-nutricionales-de-la-carambola>.
60. <http://www.propiedadesfrutas.jaimaalkauzar.es/propiedades-nutritivas-de-la-carambola.html>

VIII. ANEXOS

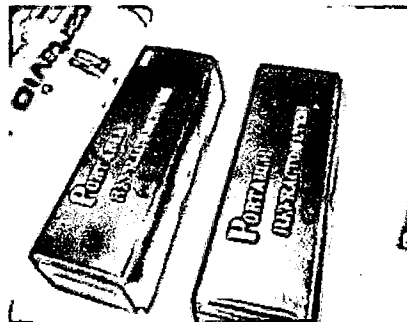
Anexo 1. Imágenes del Proceso de Acondicionamiento de los Equipos para la Deshidratación Osmótica de la carambola.



(a)



(b)



(c)



(d)

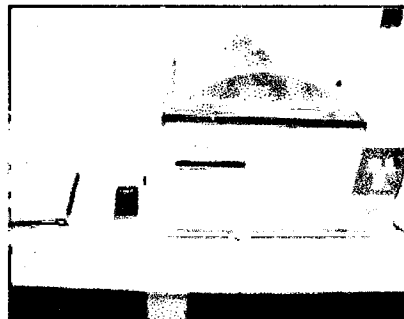
(a) Reactor con Agitador y Termostato (b) Balanza Analítica (c) Balanza Analítica de capacidad máxima 210g. (d) Refractómetro de Mano de escala 0 a 30°Brix y 0 a 80°Brix

Anexo 2. Imágenes del Proceso de Acondicionamiento de las Soluciones de Sacarosa (Azúcar) para la Deshidratación Osmótica de la carambola.



(a)

(b)



(c)

a) Preparacion de La solucion de sacarosa. (b) Pesado de la Solucion de sacarosa. (c) Baño María a la temperatura de operación según el experimento a realizar.

Anexo 3. Imágenes del Tratamiento Térmico del fruto de La carambola antes de la Deshidratación Osmótica.

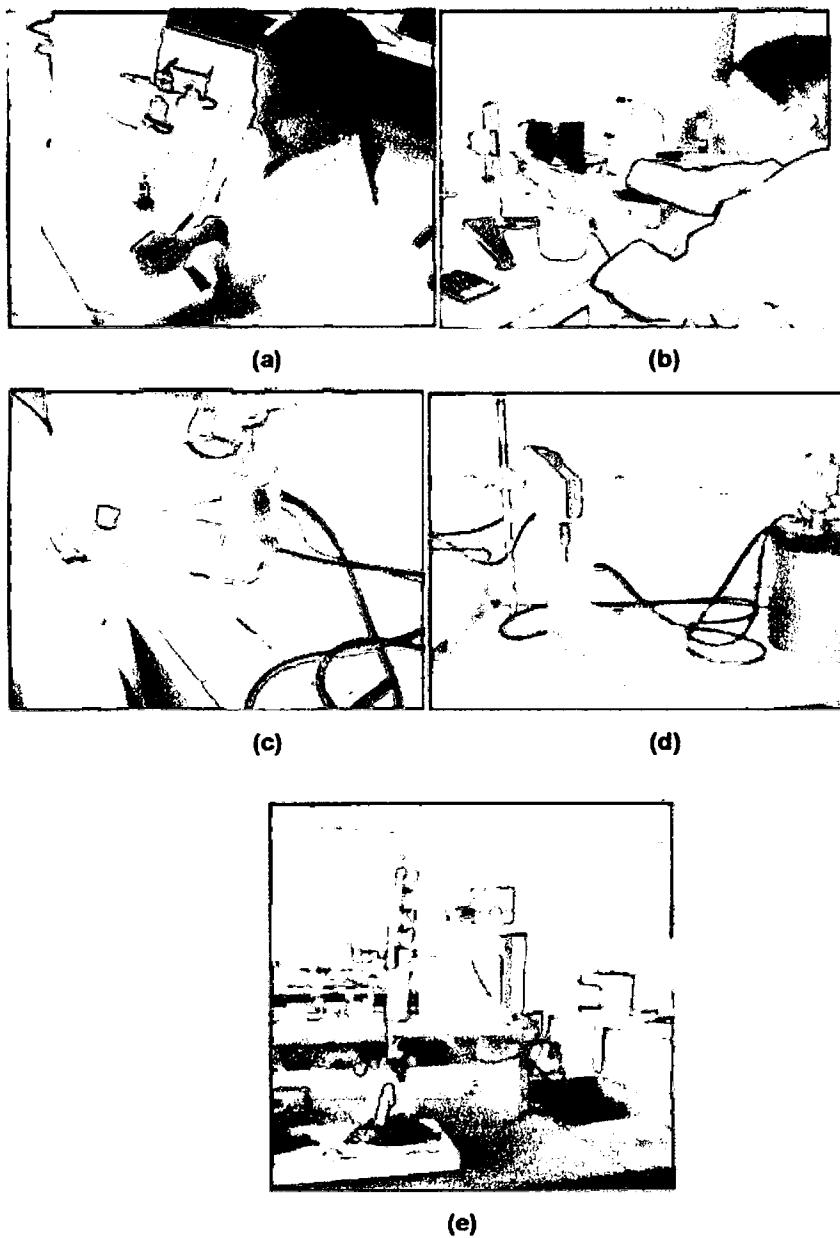


(a)

(b)

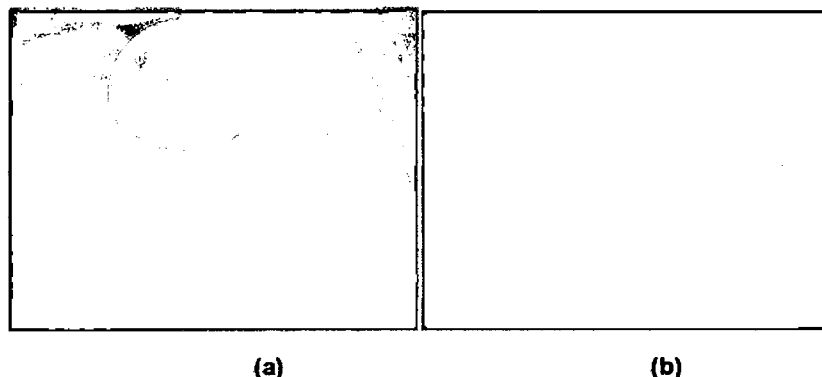
a). Tratamiento térmico (Escaldado) de las carambolas seleccionadas para la DO. b). Fruta después del tratamiento térmico (escaldado).

Anexo 4. Imágenes de Medición de Propiedades de la Solución de Sacarosa (Azúcar) para la Deshidratación Osmótica de la carambola.



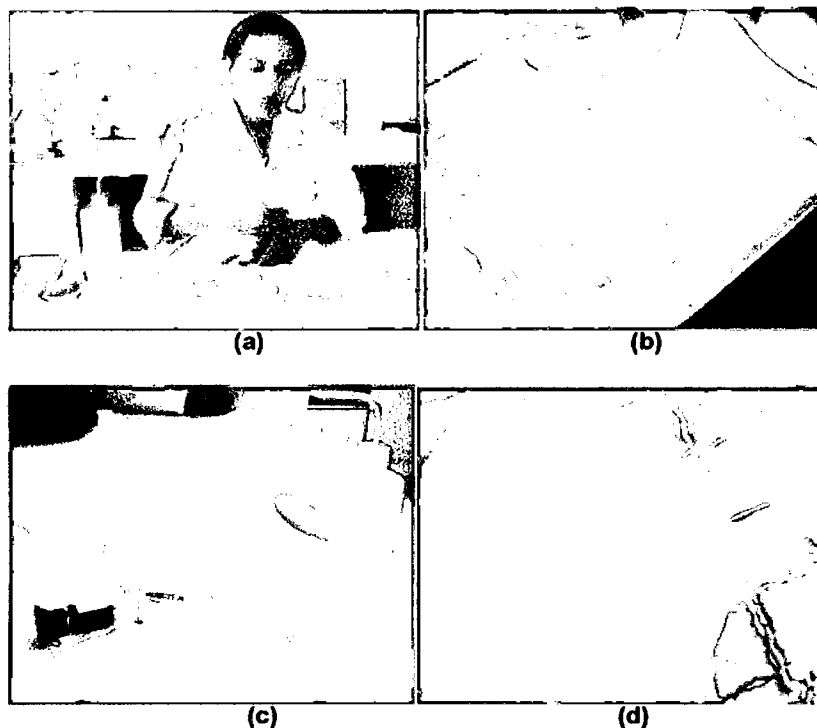
a). Registro de Datos Experimentales. b). Medición de la viscosidad de la solución de sacarosa. c). Inmersión de los cubos de fruta. d). Disposición de los cubos de fruta en el reactor. **Análisis Proximal del fruto de la carambola (Determinación de Fibra).** Laboratorio de Química – UNJBG - Tacna.

Anexo 5. Imágenes del Proceso de Acondicionamiento de la materia prima (cubos de carambola) para la Deshidratación Osmótica.



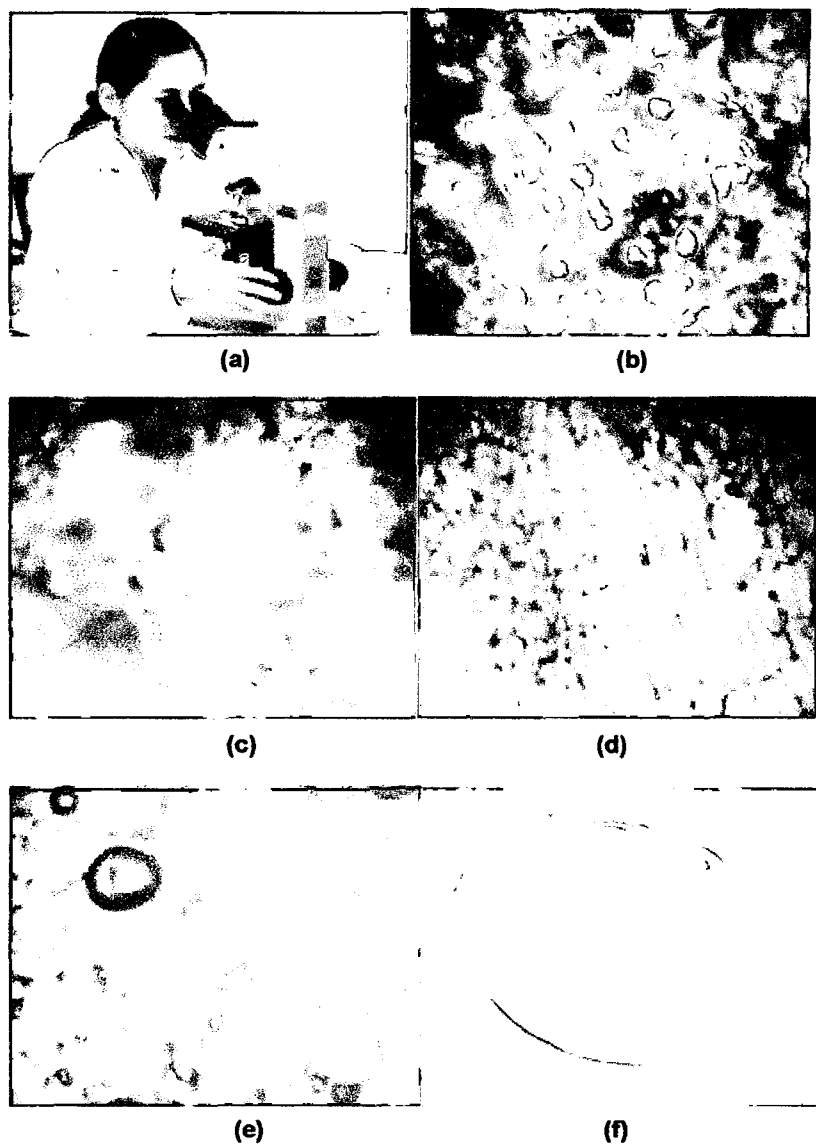
a). Preparación de los cubos de carambola. B). Cubos de carambola antes de iniciar el Tratamiento Osmótico. Laboratorio de Procesos – UNAMAD – Madre de Dios.

Anexo 6. Imágenes de la toma de datos después del Proceso de Deshidratación Osmótica de la carambola.



a). Medición de los Grados Brix de la solución osmótica durante la DO de los cubos de carambola. b). Cubos de carambola al finalizar la DO. c). Materiales para la análisis de sólidos solubles en las diferentes pruebas experimentales. d). Disposición de los Cubos de Carambola en Inmersión (solución de sacarosa).

Anexo 7. Imágenes del Proceso de Acondicionamiento de las Soluciones de Sacarosa (Azúcar) para la Deshidratación Osmótica de la carambola.



a). Análisis al microscópio de las muestras antes y después de la DO. b). Vista 1 al microscópio a 10x Porosidad de las muestras antes de la deshidratación osmótica. c). Vista 2 al microscópio a 4x, estructura celular de las muestras antes de la DO. d). Vista 3 al microscópio a 4x, tejido epitelial de las muestras antes de la deshidratación osmótica. e). Vista 4 al microscópio a 4x. Estructura Celular de las muestras después de la DO. f). Cubos de carambola después del Proceso de DO y secados a la estufa a 60°C.

Anexo 8. Ganancia de Sólidos $GS_t = Y_1$

TEMPERATURA 30°C

Linear Regression

$$Y = -15.534 + 0.789X$$

N = 9

R = 1.000

Rsqr = 0.999

Adj Rsqr = 0.999

Standard Error of Estimate = 0.814

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	-15.534	1.333	-11.653	<0.001	
x	0.789	0.00691	114.159	<0.001	1

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	8641.386	8641.386	13032.279	<0.001
Residual	7	4.642	0.663		
Total	8	8646.027	1080.753		

PRESS = 9.755

Normality

Test: Passed (P = 0.684)

Constant

Variance

Test: Passed (P = 0.809)

Power of performed test with alpha = 0.050: 1.000

% Confidence Intervals:

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	79.12	77.825	80.416	76.799	81.441
2	94.896	93.871	95.921	92.715	97.077
3	110.672	109.875	111.468	108.588	112.755
4	126.447	125.789	127.105	124.412	128.482
5	142.223	141.556	142.89	140.185	144.261
6	150.111	149.382	150.839	148.052	152.17
7	157.999	157.18	158.817	155.906	160.091
8	165.887	164.957	166.816	163.749	168.024
9	173.774	172.721	174.828	171.58	175.969

TEMPERATURA 50°C (X₁)

Linear Regression

$$Y_2 = -31.838 + 0.631X$$

N = 9

R = 0.997

Rsqr = 0.995

Adj Rsqr = 0.994

Standard Error of Estimate = 2.076

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	-31.838	3.398	-9.369	<0.001	
x	0.631	0.0176	35.799	<0.001	0.997

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	5521.99	5521.99	1281.556	<0.001
Residual	7	30.162	4.309		
Total	8	5552.151	694.019		

PRESS = 62.498

Normality

Test: Passed (P = 0.580)

Constant Variance

Test: Passed (P = 0.948)

Power of performed test with alpha = 0.050: 1.000

% Confidence Intervals:

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	43.827	40.524	47.129	37.91	49.743
2	56.437	53.825	59.05	50.877	61.998
3	69.048	67.017	71.079	63.736	74.36
4	81.659	79.982	83.337	76.472	86.846
5	94.27	92.57	95.97	89.075	99.465
6	100.575	98.718	102.433	95.327	105.823
7	106.881	104.794	108.968	101.547	112.215
8	113.186	110.818	115.555	107.736	118.636
9	119.492	116.807	122.177	113.897	125.086

TEMPERATURA 60°C (X₁)

Linear Regression

$$Y_3 = -37.937 + 0.631X$$

N = 9

R = 0.995

Rsqr = 0.991

Adj Rsqr = 0.990

Standard Error of Estimate = 2.680

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	-37.937	4.387	-8.648	<0.001	
x	0.631	0.0227	27.747	<0.001	0.995

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	5528.312	5528.312	769.874	<0.001
Residual	7	50.266	7.181		
Total	8	5578.577	697.322		

PRESS = 103.578

Normality

Test: Passed (P = 0.534)

Constant

Variance

Test: Passed (P = 0.948)

Power of performed test with alpha = 0.050: 1.000

=====

% Confidence Intervals:

=====

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	37.771	33.507	42.035	30.134	45.409
2	50.389	47.017	53.761	43.211	57.567
3	63.007	60.385	65.629	56.15	69.865
4	75.625	73.46	77.791	68.929	82.322
5	88.243	86.048	90.438	81.537	94.949
6	94.552	92.155	96.95	87.777	101.327
7	100.861	98.167	103.556	93.976	107.747
8	107.17	104.113	110.228	100.135	114.206
9	113.479	110.013	116.945	106.257	120.702

CONCENTRACION 55°BRIX (X₂)

Linear Regression

$$Y_1 = -31.709 + 0.757x$$

N = 9

R = 0.998 Rsqr = 0.997 Adj Rsqr = 0.996

Standard Error of Estimate = 1.935

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	-31.709	3.168	-10.01	<0.001	
x	0.757	0.0164	46.109	<0.001	0.998

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	7960.042	7960.042	2126.054	<0.001
Residual	7	26.208	3.744		
Total	8	7986.25	998.281		

PRESS = 54.549

Normality Test: Passed (P = 0.615)

Constant
Variance Test: Passed (P = 0.948)

Power of performed test with alpha = 0.050: 1.000

=====
% Confidence Intervals:
=====

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	59.136	56.058	62.215	53.622	64.651
2	74.277	71.843	76.712	69.094	79.46
3	89.418	87.525	91.312	84.467	94.37
4	104.559	102.996	106.123	99.724	109.395
5	119.7	118.115	121.285	114.858	124.543
6	127.271	125.539	129.002	122.379	132.163
7	134.841	132.896	136.787	129.869	139.813
8	142.412	140.204	144.619	137.332	147.492
9	149.982	147.48	152.485	144.767	155.198

CONCENTRACION 60°BRIX

Linear Regression

$$Y_2 = -40.208 + 0.779X$$

N = 9

R = 0.997 Rsqr = 0.994 Adj Rsqr = 0.993

Standard Error of Estimate = 2.645

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	-40.208	4.33	-9.287	<0.001	
x	0.779	0.0224	34.721	<0.001	0.997

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	8432.565	8432.565	1205.544	<0.001
Residual	7	48.964	6.995		
Total	8	8481.529	1060.191		

PRESS = 101.396

Normality Test: Passed (P = 0.575)

Constant

Variance Test: Passed (P = 0.948)

Power of performed test with alpha = 0.050: 1.000

=====

% Confidence Intervals:

=====

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	53.296	49.087	57.504	45.758	60.834
2	68.88	65.551	72.208	61.795	75.964
3	84.463	81.876	87.051	77.695	91.232
4	100.047	97.91	102.185	93.438	106.656
5	115.631	113.465	117.798	109.013	122.25
6	123.423	121.057	125.79	116.736	130.11
7	131.215	128.556	133.874	124.419	138.011
8	139.007	135.99	142.025	132.063	145.951
9	146.799	143.378	150.22	139.671	153.927

CONCENTRACION 65°BRIX (X₂)

Linear Regression

$$Y_3 = -31.709 + 0.757X$$

N = 9

R = 0.998 Rsqr = 0.997 Adj Rsqr = 0.996

Standard Error of Estimate = 1.935

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	-31.709	3.168	-10.01	<0.001	
X	0.757	0.0164	46.109	<0.001	0.998

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	7960.042	7960.042	2126.054	<0.001
Residual	7	26.208	3.744		
Total	8	7986.25	998.281		

PRESS = 54.549

Normality Test: Passed (P = 0.615)

Constant
Variance Test: Passed (P = 0.948)

Power of performed test with alpha = 0.050: 1.000

=====
% Confidence Intervals:
=====

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	59.136	56.058	62.215	53.622	64.651
2	74.277	71.843	76.712	69.094	79.46
3	89.418	87.525	91.312	84.467	94.37
4	104.559	102.996	106.123	99.724	109.395
5	119.7	118.115	121.285	114.858	124.543
6	127.271	125.539	129.002	122.379	132.163
7	134.841	132.896	136.787	129.869	139.813
8	142.412	140.204	144.619	137.332	147.492
9	149.982	147.48	152.485	144.767	155.198

RELACION F/S 0.27

Linear Regression

$$Y_1 = -32.926 + 0.627X$$

N. = 9

R = 0.997

Rsqr = 0.994 Adj Rsqr = 0.993

Standard Error of Estimate = 2.182

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	-32.926	3.571	-9.22	<0.001	
X	0.627	0.0185	33.881	<0.001	0.997

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	5463.351	5463.351	1147.952	<0.001
Residual	7	33.315	4.759		
Total	8	5496.665	687.083		

PRESS = 68.955

Normality Test: Passed (P = 0.571)

Constant

Variance Test: Passed (P = 0.948)

Power of performed test with alpha = 0.050: 1.000

=====

Regression Diagnostics:

=====

Row	Std. Res.	Stud. Res.	Stud. Del. Res.
1	1.352	1.828	2.340 <
9	1.406	1.68	2.013 <

=====

% Confidence Intervals:

=====

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	42.336	38.865	45.807	36.118	48.554
2	54.88	52.134	57.625	49.036	60.723
3	67.423	65.289	69.558	61.841	73.006
4	79.967	78.204	81.73	74.515	85.418
5	92.511	90.724	94.298	87.051	97.97
6	98.782	96.83	100.735	93.267	104.298
7	105.054	102.861	107.248	99.449	110.66
8	111.326	108.837	113.815	105.599	117.054
9	117.598	114.776	120.42	111.718	123.478

RELACION F/S 0.38

Linear Regression

$$Y_2 = -16.872 + 0.543X$$

N = 9

R = 0.999

Rsqr = 0.998 Adj Rsqr = 0.998

Standard Error of Estimate = 0.953

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	-16.872	1.561	-10.81	<0.001	
X	0.543	0.00809	67.064	<0.001	0.999

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	4087.892	4087.892	4497.579	<0.001
Residual	7	6.362	0.909		
Total	8	4094.255	511.782		

PRESS = 13.309

Normality Test: Passed (P = 0.652)

Constant

Variance Test: Passed (P = 0.742)

Power of performed test with alpha = 0.050: 1.000

Regression Diagnostics:

Row	Std. Res.	Stud. Res.	Stud. Del. Res.
1	1.396	1.887	2.493 <

% Confidence Intervals:

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	48.231	46.714	49.748	45.513	50.948
2	59.081	57.881	60.281	56.527	61.635
3	69.931	68.999	70.864	67.492	72.371
4	80.782	80.011	81.552	78.399	83.164
5	91.632	90.851	92.413	89.246	94.018
6	97.057	96.204	97.91	94.647	99.468
7	102.483	101.524	103.441	100.033	104.932
8	107.908	106.82	108.995	105.405	110.411
9	113.333	112.1	114.566	110.763	115.903

RELACION F/S 0.5

Linear Regression

$$Y_3 = 0.318 + 0.454X$$

N = 9

R = 1.000

Rsqr = 1.000 Adj Rsqr = 1.000

Standard Error of Estimate = 0.015

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	0.318	0.0242	13.152	<0.001	
X	0.454	0.000125	3618.74	<0.001	1

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	2857.76	2857.76	13095277.48	<0.001
Residual	7	0.00153	0.000218		
Total	8	2857.762	357.22		

PRESS = 0.00323

Normality Test: Passed (P = 0.681)

Constant

Variance Test: Passed (P = 0.809)

Power of performed test with alpha = 0.050: 1.000

=====

Regression Diagnostics:

=====

Row	Std. Res.	Stud. Res.	Stud. Del. Res.
1	-1.442	-1.949	-2.668 <

=====

% Confidence Intervals:

=====

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	54.751	54.727	54.774	54.709	54.793
2	63.823	63.804	63.842	63.783	63.863
3	72.895	72.881	72.91	72.857	72.933
4	81.967	81.955	81.979	81.93	82.004
5	91.039	91.027	91.051	91.002	91.076
6	95.575	95.562	95.589	95.538	95.613
7	100.111	100.097	100.126	100.074	100.149
8	104.648	104.631	104.664	104.609	104.686
9	109.184	109.164	109.203	109.144	109.223



Anexo 9. Perdida de Agua $PH_t = Y_2$

TEMPERATURA 30°C

Linear Regression

$$Y_1 = 24.790 + 0.0729X$$

N = 9

R = 0.732

Rsqr = 0.536 Adj Rsqr = 0.470

Standard Error of Estimate = 3.022

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	24.79	4.947	5.011	0.002	
X	0.0729	0.0256	2.845	0.025	0.732

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	73.903	73.903	8.092	0.025
Residual	7	63.931	9.133		
Total	8	137.834	17.229		

PRESS = 140.644

Normality Test: Passed (P = 0.409)

Constant

Variance Test: Passed (P = 0.580)

Power of performed test with alpha = 0.050: 0.628

Regression Diagnostics:

Row	Std. Res.	Stud. Res.	Stud. Del. Res.
1	1.542	2.085 <	3.134 <

% Confidence Intervals:

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	33.544	28.735	38.352	24.93	42.157
2	35.003	31.2	38.805	26.908	43.098
3	36.461	33.505	39.418	28.728	44.195
4	37.92	35.478	40.363	30.368	45.472
5	39.379	36.904	41.855	31.817	46.942
6	40.109	37.405	42.813	32.468	47.749
7	40.838	37.8	43.877	33.073	48.603
8	41.568	38.12	45.016	33.633	49.502
9	42.297	38.388	46.206	34.152	50.442

TEMPERATURA 50°C

Linear Regression

$$Y_2 = 1.833 + 0.139X$$

N = 9

R = 0.951

Rsqr = 0.905 Adj Rsqr = 0.891

Standard Error of Estimate = 2.005

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	1.833	3.282	0.559	0.594	
X	0.139	0.017	8.143	<0.001	0.951

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	266.501	266.501	66.312	<0.001
Residual	7	28.132	4.019		
Total	8	294.634	36.829		

PRESS = 57.623

Normality Test: Passed (P = 0.506)

Constant

Variance Test: Passed (P = 0.844)

Power of performed test with alpha = 0.050: 0.995

=====

Regression Diagnostics:

=====

Row	Std. Res.	Stud. Res.	Stud. Del. Res.
1	1.277	1.727	2.110 <
9	1.533	1.831	2.348 <

=====

% Confidence Intervals:

=====

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	18.456	15.266	21.645	12.742	24.169
2	21.226	18.703	23.749	15.856	26.596
3	23.996	22.035	25.958	18.866	29.127
4	26.767	25.147	28.387	21.757	31.776
5	29.537	27.895	31.179	24.52	34.554
6	30.922	29.129	32.716	25.854	35.991
7	32.308	30.292	34.323	27.156	37.459
8	33.693	31.406	35.98	28.429	38.956
9	35.078	32.485	37.671	29.675	40.481

TEMPERATURA 60°C

Linear Regression

$$Y_3 = -3.077 + 0.165X$$

N = 9

R = 0.950

Rsqr = 0.902 Adj Rsqr = 0.888

Standard Error of Estimate = 2.416

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	-3.077	3.956	-0.778	0.462	
X	0.165	0.0205	8.024	<0.001	0.95

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	375.926	375.926	64.379	<0.001
Residual	7	40.875	5.839		
Total	8	416.801	52.1		

PRESS = 82.720

Normality Test: Passed (P = 0.599)

Constant

Variance Test: Passed (P = 0.844)

Power of performed test with alpha = 0.050: 0.994

=====

Regression Diagnostics:

=====

Row	Std. Res.	Stud. Res.	Stud. Del. Res.
9	1.588	1.897	2.520 <

=====

% Confidence Intervals:

=====

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	16.666	12.821	20.511	9.779	23.553
2	19.956	16.915	22.997	13.484	26.429
3	23.247	20.882	25.611	17.063	29.43
4	26.537	24.584	28.49	20.499	32.575
5	29.827	27.848	31.807	23.78	35.875
6	31.473	29.31	33.635	25.363	37.582
7	33.118	30.688	35.547	26.909	39.327
8	34.763	32.006	37.52	28.419	41.107
9	36.408	33.283	39.534	29.895	42.921

CONCENTRACION 55°BRIX

Linear Regression

$$Y_1 = 19.304 + 0.0710X$$

N = 9

R = 1.000

Rsqr = 1.000 Adj Rsqr = 1.000

Standard Error of Estimate = 0.053

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	19.304	0.0867	222.61	<0.001	
X	0.071	0.000449	158.057	<0.001	1

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	70.096	70.096	24982.089	<0.001
Residual	7	0.0196	0.00281		
Total	8	70.116	8.764		

PRESS = 0.0472

Normality Test: Passed (P = 0.380)

Constant

Variance Test: Failed (P = 0.043)

Power of performed test with alpha = 0.050: 1.000

=====

Regression Diagnostics:

=====

Row	Std. Res.	Stud. Res.	Stud. Del. Res.
1	-1.846	-2.495	< -6.942

=====

% Confidence Intervals:

=====

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	27.829	27.745	27.913	27.678	27.98
2	29.25	29.183	29.316	29.108	29.392
3	30.67	30.619	30.722	30.535	30.806
4	32.091	32.049	32.134	31.959	32.224
5	33.512	33.469	33.556	33.38	33.645
6	34.223	34.175	34.27	34.089	34.356
7	34.933	34.88	34.986	34.797	35.069
8	35.643	35.583	35.704	35.504	35.782
9	36.354	36.285	36.422	36.211	36.497

CONCENTRACION 60°BRIX

Linear Regression

$$Y_2 = 6.576 + 0.114X$$

N = 9

R = 0.999

Rsqr = 0.999 Adj Rsqr = 0.999

Standard Error of Estimate = 0.184

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	6.576	0.301	21.872	<0.001	
X	0.114	0.00156	73.119	<0.001	0.999

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	180.362	180.362	5346.394	<0.001
Residual	7	0.236	0.0337		
Total	8	180.598	22.575		

PRESS = 0.458

Normality Test: Passed (P = 0.669)

Constant

Variance Test: Passed (P = 0.809)

Power of performed test with alpha = 0.050: 1.000

=====

Regression Diagnostics:

=====

Row	Std. Res.	Stud. Res.	Stud. Del. Res.
9	1.589	1.898	2.522 <

=====

% Confidence Intervals:

=====

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	20.251	19.959	20.543	19.728	20.775
2	22.53	22.299	22.761	22.038	23.022
3	24.809	24.63	24.989	24.339	25.279
4	27.089	26.94	27.237	26.63	27.548
5	29.368	29.217	29.518	28.908	29.827
6	30.507	30.343	30.672	30.043	30.972
7	31.647	31.462	31.832	31.175	32.119
8	32.786	32.577	32.996	32.304	33.269
9	33.926	33.688	34.164	33.431	34.421

CONCENTRACION 65°BRIX

Linear Regression

$$Y_3 = 0.823 + 0.143X$$

N = 9

R = 0.952

Rsqr = 0.906

Adj Rsqr = 0.892

Standard Error of Estimate = 2.051

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	0.823	3.358	0.245	0.813	
X	0.143	0.0174	8.206	<0.001	0.952

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	283.258	283.258	67.337	<0.001
Residual	7	29.446	4.207		
Total	8	312.704	39.088		

PRESS = 60.141

Normality Test: Passed (P = 0.534)

Constant Variance
Test: Passed (P = 0.844)

Power of performed test with alpha = 0.050: 0.995

=====

Regression Diagnostics:

=====

Row	Std. Res.	Stud. Res.	Stud. Del. Res.
1	1.264	1.709	2.073 <
9	1.544	1.845	2.383 <

=====

% Confidence Intervals:

=====

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	17.96	14.697	21.224	12.115	23.806
2	20.817	18.236	23.398	15.323	26.31
3	23.673	21.666	25.679	18.424	28.921
4	26.529	24.872	28.186	21.404	31.654
5	29.385	27.705	31.065	24.253	34.518
6	30.813	28.978	32.649	25.628	35.999
7	32.241	30.179	34.304	26.971	37.511
8	33.669	31.329	36.009	28.285	39.054
9	35.098	32.445	37.75	29.57	40.626

RELACION 0.27

Linear Regression

$$Y_1 = 0.823 + 0.143X$$

N = 9

R = 0.952

Rsqr = 0.906 Adj Rsqr = 0.892

Standard Error of Estimate = 2.051

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	0.823	3.358	0.245	0.813	
X	0.143	0.0174	8.206	<0.001	0.952

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	283.258	283.258	67.337	<0.001
Residual	7	29.446	4.207		
Total	8	312.704	39.088		

PRESS = 60.141

Normality Test: Passed (P = 0.534)

Constant

Variance Test: Passed (P = 0.844)

Power of performed test with alpha = 0.050: 0.995

=====

Regression Diagnostics:

=====

Row	Std. Res.	Stud. Res.	Stud. Del. Res.
1	1.264	1.709	2.073 <
9	1.544	1.845	2.383 <

=====

% Confidence Intervals:

=====

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	17.96	14.697	21.224	12.115	23.806
2	20.817	18.236	23.398	15.323	26.31
3	23.673	21.666	25.679	18.424	28.921
4	26.529	24.872	28.186	21.404	31.654
5	29.385	27.705	31.065	24.253	34.518
6	30.813	28.978	32.649	25.628	35.999
7	32.241	30.179	34.304	26.971	37.511
8	33.669	31.329	36.009	28.285	39.054
9	35.098	32.445	37.75	29.57	40.626

RELACION 0.38

Linear Regression

$$Y_2 = 3.421 + 0.137X$$

N = 9

R = 0.935

Rsqr = 0.873 Adj Rsqr = 0.855

Standard Error of Estimate = 2.328

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	3.421	3.811	0.898	0.399	
X	0.137	0.0198	6.948	<0.001	0.935

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	261.582	261.582	48.277	<0.001
Residual	7	37.928	5.418		
Total	8	299.51	37.439		

PRESS = 78.278

Normality Test: Passed (P = 0.458)

Constant

Variance Test: Passed (P = 0.844)

Power of performed test with alpha = 0.050: 0.986

Regression Diagnostics:

Row	Std. Res.	Stud. Res.	Stud. Del. Res.
1	1.304	1.763	2.189 <
9	1.519	1.815	2.309 <

% Confidence Intervals:

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	19.889	16.186	23.593	13.255	26.524
2	22.634	19.705	25.563	16.399	28.869
3	25.379	23.101	27.656	19.422	31.336
4	28.124	26.242	30.005	22.307	33.94
5	30.868	28.962	32.775	25.043	36.693
6	32.241	30.158	34.324	26.356	38.126
7	33.613	31.273	35.953	27.632	39.594
8	34.985	32.33	37.641	28.874	41.097
9	36.358	33.347	39.369	30.084	42.632

RELACION 0.5

Linear Regression

$$Y_3 = 6.699 + 0.128 X$$

N = 9

R = 0.907

Rsqr = 0.822 Adj Rsqr = 0.797

Standard Error of Estimate = 2.642

	Coefficient	Std. Error	t	P	Std. Coeff.
Constant	6.699	4.325	1.549	0.165	
X	0.128	0.0224	5.69	<0.001	0.907

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	226.056	226.056	32.381	<0.001
Residual	7	48.868	6.981		
Total	8	274.924	34.366		

PRESS = 102.208

Normality Test: Passed (P = 0.495)

Constant

Variance Test: Passed (P = 0.948)

Power of performed test with alpha = 0.050: 0.959

Regression Diagnostics:

Row	Std. Res.	Stud. Res.	Stud. Del. Res.
1	1.354	1.83	2.346 <
9	1.485	1.774	2.213 <

=====
% Confidence Intervals:
=====

Row	Predicted	95% Conf-L	95% Conf-U	95% Pred-L	95% Pred-U
1	22.008	17.804	26.213	14.478	29.539
2	24.56	21.235	27.885	17.483	31.637
3	27.111	24.526	29.697	20.35	33.873
4	29.663	27.528	31.798	23.06	36.266
5	32.215	30.05	34.379	25.603	38.827
6	33.49	31.126	35.855	26.81	40.171
7	34.766	32.11	37.423	27.977	41.555
8	36.042	33.027	39.056	29.105	42.979
9	37.318	33.9	40.735	30.196	44.439

GLOSARIO

- ARILO** : Cobertura carnosa de ciertas semillas formado del *funículo* (punto de unión de la semilla al ovario), puede crearse de una estructura frutal (conocido como *falso fruto*) producida en muy pocas especies de gimnospermas (*Solomon 2001*).
- ASINTOTAS** : Función cuya representación es gráfica y en forma de línea recta o parabólica que, dentro de un trazo aleatorio, su trayectoria es de aproximación a una curva que representa a otra gráfica de otra función; ambas tienen sus límites dentro del área definida por la integral que asocia la razón de ambos gráficos (*Solomon 2001*).
- APOPLASTO :** Espacio extracelular periférico al plasmalema de las células vegetales por el que fluyen agua y otras sustancias; este transporte se dice que se realiza por la vía del apoplasto. En las raíces llega a representar un 10% de su volumen (*Solomon 2001*).
- CONTACTOR** : Sistema que permite que el soluto y el solvente, tengan mayor área específica de contacto por consiguiente el área para la transferencia de masa es muy elevada (*Solomon 2001*).
- EXCIPIENTE** : Sustancia inactiva usada para incorporar el principio activo. Además pueden ser usados para ayudar al proceso mediante el cual un producto es manufacturado (*Solomon 2001*).
- FOLIOLOS** : Cada una de las piezas separadas algunas por el limbo de una hoja. Cuando el limbo foliar está formado por un solo foliolo, se dice que la hoja es una hoja simple. Cuando el limbo foliar está dividido en foliolos se dice que la hoja es hoja compuesta (*Solomon 2001*).
- LUGOL** : Colorante a base de yodo y yoduro de potasio que permite identificar el almidón, el que adquiere color violeta (*Solomon 2001*).
- MACROMOLECULAS** : Moléculas que tienen una masa molecular elevada, formadas por un gran número de átomos. Generalmente se pueden

describir como la repetición de una o mas pocas unidades mínimas o monómeros formando los polímeros (*Solomon 2001*).

MODELO MATEMATICO	: Conjunto de ecuaciones, ya sean algebraicas, diferenciales o de diferencias finitas, que describen el sistema bajo estudio.
OSMOSIS	: Fenómeno físico relacionado con el comportamiento de un fluido como solvente de una solución ante una membrana semipermeable para el solvente pero no para los solutos (<i>Solomon 2001</i>).
PLASMODESMO	: Finos hilos citoplasmáticos que pasan a través de un poro en la pared celular y que pone en conexión el citoplasma de dos células contiguas (<i>Solomon 2001</i>).
PERMEABILIDAD	: Capacidad de un material para que un fluido lo atraviere sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable (<i>Solomon 2001</i>).
PEDICELOS	: Estructura que une a la flor o al fruto con la rama que la sostiene o con otra estructura más compleja. También se le conoce como pedúnculo (<i>Solomon 2001</i>).
PERENNIFOLIO	: Árboles o arbustos que poseen hojas vivas a lo largo de todo el año, es lo contrario de caducifolio (<i>Solomon 2001</i>).
PLASMÓLISIS	: Encogimiento del citoplasma y separación entre la membrana plasmática y la pared celular cuando una célula vegetal pierde agua, por lo general en un medio hipertónico (<i>Solomon 2001</i>).
PRESION DE TURGENCIA	: Presión hidrostática que se desarrolla dentro de una célula con pared, como las células vegetales, cuando la presión osmótica del contenido celular es mayor que la presión osmótica del líquido circundante. Presión interna de las células provoca que se dilaten hasta donde se lo permite la elasticidad de las membranas, y por ende la resistencia de las células vecinas, es por eso que los órganos, como por

ejemplo el pecíolo, el tallo, las hojas y frutos maduros se encuentren en ese estado de firmeza (*Solomon 2001*).

- SOLUTO** : Sustancia minoritaria en una disolución, esta sustancia se encuentra disuelta en un determinado disolvente, o la sustancia que se disuelve, por lo que se puede encontrar en un estado de agregación diferente al comienzo del proceso de disolución (*Solomon 2001*).
- SIMPLASTO** : Sistema de protoplastos interconectados que forma un citoplasma continuo y que permite el paso del agua en vegetales a través de la endodermis (*Solomon 2001*).
- TONOPLASTO** : Membrana que limita la vacuola, un espacio extracelular periférico al plasmalema de las células vegetales por el que fluyen agua y otras sustancias; este transporte se dice que se realiza por la vía del apoplasto (*Solomon 2001*).
- TENSOACTIVO** : Sustancia que influye por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos fases (por ejemplo dos líquidos insolubles uno en otro) (*Solomon 2001*).
- TURGENCIA** : Fenómeno por el cual las células al absorber agua, se hinchan, ejerciendo presión contra las membranas celulares, las cuales se ponen tensas, esta relacionado con la ósmosis.
- VÍA APOPLÁSTICA** : Transporte de agua y elementos a través de las paredes celulares y espacios intercelulares, en general, no requiere energía metabólica (*Solomon 2001*).