



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE QUÍMICA**

**MODELADO DE LA CINÉTICA DE SECADO DE BETABEL
(*Beta Vulgaris*) USANDO LA SEGUNDA LEY DE FICK.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LIC. EN QUÍMICA EN ALIMENTOS**

**P R E S E N T A:
LUZ YARI ESPINOSA HERNANDEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. CARLOS ALBERTO GÓMEZ ALDAPA**





El presente trabajo de Investigación se realizó en el Centro de Investigaciones Químicas (CIQ) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) en el laboratorio de Alimentos I, bajo la dirección del Dr. Carlos Alberto Gómez Aldapa.



*El presente trabajo de investigación fue financiado por el consejo Técnico de Ciencia y Tecnología del Estado de Hidalgo, dentro del proyecto denominado **Plan estratégico para detonar el desarrollo económico-social del Municipio de Acaxochitlán, Hidalgo. FOMIX-HIDALGO. 2007-CO1-73636.***



*El futuro más brillante
Siempre se basará en un pasado que se olvida,
Por que no te ira bien en la vida;
Hasta que dejes atrás tus fracasos y penas.*

*La vida no se mide por los descansos que tomamos si no;
Por los momentos que nos roban el aliento.*

*El verdadero triunfo del hombre
Surge de las cenizas de su error.*

*Victoria es el arte de continuar
Donde los otros dejaron de luchar.*

Lo que con mucho trabajo se adquiere,

Más se ama..Aristóteles



DEDICATORIAS

A mis padres:

Aurora y Sergio

Por tanto esfuerzo y sacrificios por sacarme adelante, por que a pesar de mis errores siempre han estado a mi lado por ese amor incondicional que siempre eh sentido; esperando que este pequeño logro que es de ustedes se ha una pequeñísima forma de demostrarles cuanto los AMO.

A mis hermanos:

Eder y Abdallán

Por compartir juegos, travesuras, complicidades por que siempre los tengo presentes en mi mente, por ser los seres que me alegran el día cuando me siento sola, por regalarme la dicha de poder verlos crecer, por que simplemente son la otra mitad de mi corazón por eso y tantas cosas más los AMO monigotes.



AGRADECIMIENTOS

A ese ser que de una u otra manera me hace pensar que realmente existe, por lo que me ha permitido vivir y por las personas que ha puesto en mi camino, gracias.

A mi padre por ser el motor de mi vida por creer en mí más que yo misma por predicar con el ejemplo, por sus esfuerzos y lucha diaria por sacarme adelante, por que la vida no me alcanzará para demostrarle todo lo que lo admiro y respeto por ser mi héroe aun siendo un humano pero grande y único, ni mil palabras me alcanzarían para decir tanto lo amo.

A mi madre por ser mi ángel, por los días de desvelo y preocupación, por llorar conmigo cuando el alma se me partía , por ser mi amiga y confidente y por ser una parte esencial en mi vida por su fortaleza y gran amor gracias mami .

A mis hermanos eder y abdallán, que aun siendo más jóvenes que yo me han regalado grandes lecciones de vida, que aunque el tiempo y la distancia nos lleven por caminos separados siempre serán mí más grande tesoro los amo monigotes como no tiene idea.

A mi tío a quien quiero y respeto por las muestras de cariño y por que se que siempre podré contar con el, por los corajes que me hace pasar ja.

A mis primos por brindarme risas, por sus travesuras por ser unos angelitos (usi y lucy) por que a través de su inocencia me recuerdan que el mundo no es tan cruel y a monchi simplemente por ser él.



AGRADECIMIENTOS

A mis amigos:

A Cheli por que siempre que necesite llorar, reír, cantar, gritar, y tantas locuras más tu estabas ahí, por remarcar mis errores y mis virtudes, por tu paciencia, por tu confianza por tantas cosas que te hacen una persona única y especial, por todo lo vivido, por ser como eres así rara ¡¡ gracias nunca te olvidare te quiero mucho y te voy a extrañar un buen amiguís ¡ aja.....

A Luis por que pesar de mi genio y mis malos ratos siempre eh contado con su apoyo a pesar de tantos inconvenientes gracias por regalarme tu amistad por preocuparte y por ayudarme ,por todo muchas gracias.

A todos aquellos que en el camino de la vida encontré y dejaron huella Olivia, Imelda, Laura, Xzayil y tantos otros que no es por omitir y restarles importancia pero no acabaría nunca por los momentos que estuvieron conmigo gracias.

Al Doctor Aldapa:

Por aceptarme en los momentos de desesperación, por su tiempo, por compartir conmigo un poco de sus conocimientos, haciendo realidad este paso, y demostrarme que detrás de la faceta que me daba miedo puede ser un gran amigo gracias por escucharme, aguantarme, por apoyarme y por confiar en mi, gracias.

Al Doctor Oscar Montaña por el apoyo proporcionado para la realización de este proyecto.

A mis sinodales por el tiempo regalado para corregir este trabajo.

A mis maestros que contribuyeron a que yo llegara a este pasó gracias.

INDICE GENERAL

	Pág.
Índice general.	viii
Índice de figuras.	x
Índice de tablas.	xii
Nomenclatura.	xiii
Resumen	1
Introducción	2
Antecedentes	4
3.1 El agua en los alimentos.	4
3.1.2 Tipos de agua en los alimentos.	7
3.2 Actividad de agua.	9
3.2.1 Factores que afectan la aw.	14
3.3 Métodos de conservación.	15
3.3.1 Mecanismos de eliminación del agua.	16
3.3.1.1 Eliminación de agua por vía térmica.	17
3.3.1.2 Mecanismo de transferencia de materia.	17
3.3.1.3 Mecanismo de transmisión de calor	18
3.3.1.3.1 Conducción	18
3.3.1.3.2 Convección.	19
3.3.1.3.3 Radiación.	19
3.4 Técnicas de eliminación del agua.	19
3.4.1 Deshidratación.	20
3.5 Cinética de secado.	25
3.5.1 Período de inducción o de velocidad de secado creciente (precalentamiento).	26
3.5.1.2 Período de velocidad de secado constante.	28
3.5.1.3 Primer periodo de velocidad de velocidad decreciente.	30
3.5.1.4 Segundo periodo de velocidad decreciente	31
3.6 Modificaciones producidas en el producto con la deshidratación	31
3.6.1 Influencia de secado sobre el valor nutricional.	32
3.6.1.2 Influencia del secado sobre el color.	33
3.6.1.3 Influencia del secado sobre la estructura del producto	34

3.7	Ley de Fick	36
3.7.1	Solución de la ecuación de Fick	37
3.8	Betabel	40
3.8.1	Composición química de betabel	41
3.8.1.2	Producción nacional de betabel.	43
	Objetivos	45
4.1	Objetivo general.	45
4.2	Objetivos específicos.	45
	Metodología	46
5.1	Cortado del betabel	46
5.2	Secado del betabel	47
5.2.1	Contenido de humedad del betabel.	47
5.3	Modelado de las curvas de secado del betabel	47
5.3.1	Cálculo de la velocidad de secado betabel.	48
5.3.2	Coefficiente de difusión efectiva de agua (Defw) del betabel.	49
5.4	Determinación de color y de la estructura durante el secado de betabel	49
	Resultados y discusiones	52
6.1	Cinéticas de secado del betabel.	52
6.2	Contenido adimensional de humedad en el betabel	54
6.3	Velocidad de secado.	60
6.4	Difusividad efectiva de agua del betabel.	61
6.5	Color en el betabel	68
6.6	Estructura interna en el betabel	73
	Conclusiones	77
	Referencias bibliográficas	78

Índice de figuras

Figura 1. Estructura tetraédrica del agua.	6
Figura 2. Diferentes zonas en que se divide el agua.	8
Figura 3. Isoterma de equilibrio en base de la actividad de agua (a_w).	12
Figura 4. Diagrama esquemático ilustrando el movimiento de las moléculas de agua entre el alimento y su entorno	13
Figura 5. Esquema de las fases alimento-fluido entre las que se produce el transporte de agua durante la deshidratación debido a un gradiente de a_w .	22
Figura 6. Proceso básico de secado1) Transmisión de calor desde el gas hasta la superficie del producto. 2) Transmisión de calor desde la fase sólido-gas hasta el interior del sólido. 3) Transmisión de materia a través del sólido. 4) Transferencia de vapor desde la interfase sólido-gas hacia el seno del gas (Casp y Abril, 1999).	24
Figura 7. Curva típica de secado y de velocidad de secado.	27
Figura 8. Periodo de velocidad de secado constante.	29
Figura 9. Cambios en la morfología de cubos de hortalizas durante la desecación (Barbosa et Vega,2000).	35
Figura 10. Pérdida de peso (g) del betabel en función del tiempo de secado.	53
Figura 11. Distribución del agua en función del Ln E.	55
Figura 12: Contenido adimensional de humedad (E) del betabel calculado en función de la temperatura de secado.	56
Figura 13: Curva de Ln E en función del tiempo 60°C.	58
Figura 14: Curva de Ln E en función del tiempo 80°C.	59
Figura 15: Comparación de los valores medios de los coeficientes de difusión efectiva del betabel correspondiente a las diferentes zonas a temperatura de 60 °C y los intervalos de confianza donde se observa la diferencia estadística encontrada entre estos valores a un nivel de significancia del 95%.	64
Figura 16: Comparación de los valores medios de los coeficientes de difusión efectiva del betabel correspondiente a las diferentes zonas a temperatura de 75 °C y los intervalos de confianza donde se observa la diferencia estadística encontrada entre estos valores a un nivel de significancia del 95%.	65
Figura 17 Comparación de los valores medios de los	66

coeficientes de difusión efectiva del betabel correspondiente a las diferentes zonas a temperatura de 80°C y los intervalos de confianza donde se observa la diferencia estadística encontrada entre estos valores a un nivel de significancia del 95%.	
Figura 18. Representación de ΔE para las diferentes temperaturas Utilizadas.	69
Figura 19. Efecto de la temperatura 60°C sobre el color del betabel.	70
Figura 20. Efecto de la temperatura 75°C sobre el color del betabel.	71
Figura 21. Efecto de la temperatura 80°C sobre el color del betabel.	72
Figura 22. Micrografía betabel antes del tratamiento de secado.	74
Figura 23. Micrografía betabel a 60 °C.	75
Figura 24. Micrografía betabel a 65 °C.	75
Figura 25. Micrografía betabel a 70 °C.	75
Figura 26. Micrografía betabel a 75 °C.	75
Figura 27. Micrografía betabel a 80 °C.	76



Índice de tablas

		Pág.
Tabla 1	Composición química del betabel	42
Tabla 2.	Producción nacional del betabel.	43
Tabla 3.	Coeficiente de difusión de agua (cm^2/s) a partir de los datos de la cinética de secado del betabel empleando la segunda ley de fick.	62
Tabla 4.	Resultados del ANOVA de los valores de difusión efectiva (D_{efw}) del betabel correspondiente a todas las zonas	63



Nomenclatura

Símbolo	Nombre	Unidades
a_w	Actividad de agua	
P	Presión parcial de vapor de agua	Pa
P_o	Presión de vapor de saturación del agua pura	Pa
HRE	Humedad relativa en equilibrio	%
FL	Fracción líquida	
FG	Fracción gaseosa o porosa	
E	Contenido adimensional de humedad	
L	Espesor de la placa	cm.
X_o	Contenido inicial de humedad	g agua/g sólidos
$X_{equilibrio}$	Contenido de humedad en equilibrio	secos
D_{efw}	Coefficiente de difusión efectiva	g agua/g sólidos
m	Pendiente	secos
T	Temperatura	°C
R	Constante universal de los gases	KJ/mol
$\%H_2O$	Contenido de humedad en equilibrio	%
P_i	Peso inicial	g
P_2	Peso final	g
A	Área	cm ²
r^2	Radio elevado al cuadrado	cm
$\%SS$	Porcentaje de sólidos secos	%
P_{ss}	Peso de los sólidos secos	g
X	Humedad en exceso	
$X_{equilibrio}$	Humedad en equilibrio	g agua/sólidos
R	Velocidad de secado	secos
W_{ss}	Masa del sólido seco	agua/cm ² s
X_{x1}	Humedad libre en el tiempo 1	g sólido seco
X_{x2}	Humedad libre en el tiempo 2	g agua/g sólidos
t_{x1}	Tiempo 1	secos



t_{x2}	Tiempo 2	g agua/g sólidos
$H_{t(n)}$	Humedad en el tiempo (n)	secos
		segundos
		segundos
		g agua/g sólidos
		secos

RESUMEN

El presente trabajo es parte del Proyecto denominado «Plan Estratégico para Detonar el Desarrollo Económico-Social del Municipio de Acaxochitlán, Hidalgo». El objetivo del presente trabajo de investigación fue estudiar la cinética de secado del betabel (*beta vulgaris*) y el efecto sobre la degradación de color, el secado se realizó a diferentes temperaturas (60,65, 70, 75 y 80° C) usando una termobalanza donde se registró la pérdida de peso en función del tiempo y la temperatura. En el proceso de secado se distinguieron tres periodos, el periodo de velocidad constante, el primer periodo de velocidad decreciente y el segundo periodo de velocidad decreciente, estos periodos son importantes ya que a través de ellos se determinó que temperatura es la adecuada para el producto.

El efecto de la temperatura sobre la degradación del color se determinó midiendo mediante un colorímetro los parámetros de L, a y b cada 15 min. durante el proceso de secado de betabel observándose que la temperatura que tiene mayor efecto sobre la coloración es la de 80°C., estos parámetros son determinantes, ya que con la selección de las condiciones optimas de secado es posible obtener productos con características organolépticas adecuadas, lo cual conlleva a evitar perdidas económicas por la descomposición natural del alimento, así como también propicia la obtención de un producto con mayor valor económico.

INTRODUCCIÓN

La deshidratación es una de las técnicas más antiguamente utilizadas para la conservación de alimentos (Desrosier, 1999). La utilización de la energía solar para reducir el contenido de agua de un producto, es el procedimiento más ancestral y menos costoso de conservación.

Dentro de algunas ventajas de los alimentos deshidratados se encuentra que al reducir el contenido de humedad de ellos; se previene el crecimiento de microorganismos y se minimizan las demás reacciones que los deterioran (Domínguez, 2002). También; el secado de los alimentos reduce su volumen y peso, lo que influye en una reducción importante de los costos de empaque, almacenamiento y transporte. Los productos secos además pueden ser almacenados a temperatura ambiente por largos períodos de tiempo (Casp et Abril, 1999).

Actualmente, el aire caliente sigue siendo el método de deshidratación más usado en la industria alimentaria y química, ya que utiliza energía limpia y renovable (Krokida et al., 2003). Para seleccionar las mejores condiciones de deshidratación de un producto dado, es necesario el estudio de la cinética de pérdida del agua presente en el mismo, lo cual es esencial para diseñar un correcto proceso de secado que permita obtener un producto de calidad (Fuentes, 2004). Por otro lado, un buen modelamiento matemático del proceso de secado puede considerarse como una herramienta muy eficiente para salvar obstáculos, tales como, daños al producto, consumo excesivo de energía, desgaste del equipo o la disminución del rendimiento (Olivas et al., 1999).

Para llevar a cabo un buen proceso de secado se debe tomar en cuenta la estructura del alimento a deshidratar, para no perder en el proceso la calidad del mismo.

El secado de vegetales a altas temperaturas afecta las propiedades organolépticas del producto y su valor nutricional (Krokida et al., 2003). Durante esta operación se afectan la textura, el color, la densidad, la porosidad y sus

características de adsorción (Krokida et Maroulis, 2001), además se pueden presentar los fenómenos de endurecimiento y encogimiento (Madariaga, 2002), por lo que la temperatura es una de las variables más importantes en los estudios cinéticos, pues aunque temperaturas elevadas pudieran acelerar el proceso, la pérdida de calidad del producto no compensaría la reducción de tiempo de proceso. Krokida et al. (2003), estudiaron el efecto de algunas variables tecnológicas, tales como la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire de secado y el tamaño de partícula del material de estudio, y cómo estas variables influyen en el secado de diferentes vegetales, modelando la cinética del proceso con ecuaciones empíricas.

Existen varias ecuaciones empíricas para simular el proceso de secado que sirven para modelar la cinética, la optimización del proceso y para el diseño de secadores (Kiranoudis et al., 1992). Entre estas ecuaciones destacan las propuestas por Newton, Henderson-Pabis, Page, Page modificado (Doymaz, 2004; Akpınar, 2005). La mayoría de estas ecuaciones derivan del modelo difusional de la segunda ley de Fick, la cual fue resuelta para diferentes geometrías (Vega et Lemus, 2005).

El propósito del presente trabajo de investigación fue estudiar el proceso de secado del betabel, modelando las cinéticas de secado empleando las ecuaciones difusionales de Fick (Badui, 1999), con la finalidad de obtener mayor información acerca del efecto del tratamiento térmico sobre el betabel, obteniendo así las mejores condiciones de secado; las cuales se podrán utilizar posteriormente como una alternativa para su producción en el Municipio de Acaxochitlan, Hgo., dando así mayor aprovechamiento a sus tierras y generando una nueva fuente de trabajo originando así una fuente de desarrollo económico en la región mediante la utilización del betabel ya sea mediante la industrialización de este o en otro tipo de productos, que se puedan consumir en forma de frituras o suplementos alimenticios que contengan este producto.

ANTECEDENTES

3.1. El agua en los alimentos

La presencia del agua en los alimentos contribuye de forma importante a su deterioro, por lo tanto, la disminución del contenido de agua en un alimento reduce la posibilidad de su alteración biológica y, de forma apreciable, la velocidad de otros mecanismos de deterioro (Casp et Abril 1999).

La cantidad de agua presente en algunos alimentos puede alcanzar hasta un 97%, como es el caso de algunas frutas, en las que su presencia es un factor fundamental para la frescura; incluso algunos deshidratados, que en apariencia son totalmente secos, contienen entre un 10 y 12% de humedad (Badui, 1999).

El agua influye en las propiedades de los alimentos y, a su vez, los componentes de los alimentos influyen en las propiedades del agua. Es muy importante conocer el comportamiento que presenta la molécula del agua, ya que influye en el diseño de procesos, siendo decisiva para obtener deshidratados de calidad; en la rehidratación y en el congelamiento es preciso comprender la manera como se comporta, tanto en forma líquida como en hielo, para evitar posibles daños al alimento.

Para lograr lo anterior, es preciso conocer las interacciones que tiene con otros componentes propios del alimento, como son: proteínas, carbohidratos, lípidos, sales y ácidos orgánicos (Badui, 1999). La forma en que el agua interactúa consigo misma y con el resto de los componentes de los alimentos es debido a su estructura molecular.

La molécula de agua está constituida por dos átomos de hidrógeno unidos en forma covalente a un átomo de oxígeno; es altamente polar y crea estructuras tridimensionales debido a la hibridación de los orbitales moleculares s y p del oxígeno; las $1s$ del hidrógeno comparten dos electrones con los orbitales híbridos sp^3 del oxígeno, a su vez, este elemento tiene un par de electrones libres considerados como fuerzas separadas, los cuales junto con los dos

enlaces covalentes, establecen una molécula con forma tetraédrica (Figura 1; Fennema, 2000).

En el agua existe un momento bipolar muy fuerte, ya que el oxígeno, al ser un elemento muy electronegativo, atrae hacia sí los electrones de los hidrógenos, ocasionando que éstos posean una carga parcial positiva y, por tanto, que el átomo de oxígeno posea una carga parcial negativa. Por lo que, la molécula del agua no tiene carga determinada, pero si un dipolo eléctrico potente que le permite crear puentes de hidrogeno estables con otras moléculas iguales o diferentes, pero de naturaleza polar (Fennema, 2000).

El puente de hidrógeno no es un enlace químico propiamente, es una atracción electrostática que se produce cuando dos átomos negativos presentes en compuestos polares se unen mediante uno de hidrogeno, de tal manera que solo participan los elementos más electronegativos. Debido a las características que presenta el agua, estas uniones se inducen en cualquier sustancia que tenga características polares, como las proteínas y los carbohidratos, gracias a sus diversos grupos hidrófilos, los polímeros y algunos compuestos de bajo peso molecular, quienes retienen agua y le confieren a los alimentos propiedades reológicas particulares (Allegra et al., 1999).

La presencia de sustancias disueltas en el liquido dentro de las células de las frutas, permiten a los tejidos de estos alimentos mantener su calidad crujiente o de turgencia (Charley, 2001). Además de influenciar la capacidad de retención del agua de los tejidos, los solutos disminuyen la actividad de agua. Lo cual se debe a que los solutos compiten por el agua, ocasionando que cambie la conformación especial del polímetro, al liberar agua se da una redistribución de la misma en el material; las sales pueden estabilizar o desestabilizar las capas de hidratación sobre un polímero. Estos fenómenos son más evidentes cuando el contenido de agua es el suficiente como para que se presenten propiedades de disolvente (Lewicki, 2003).

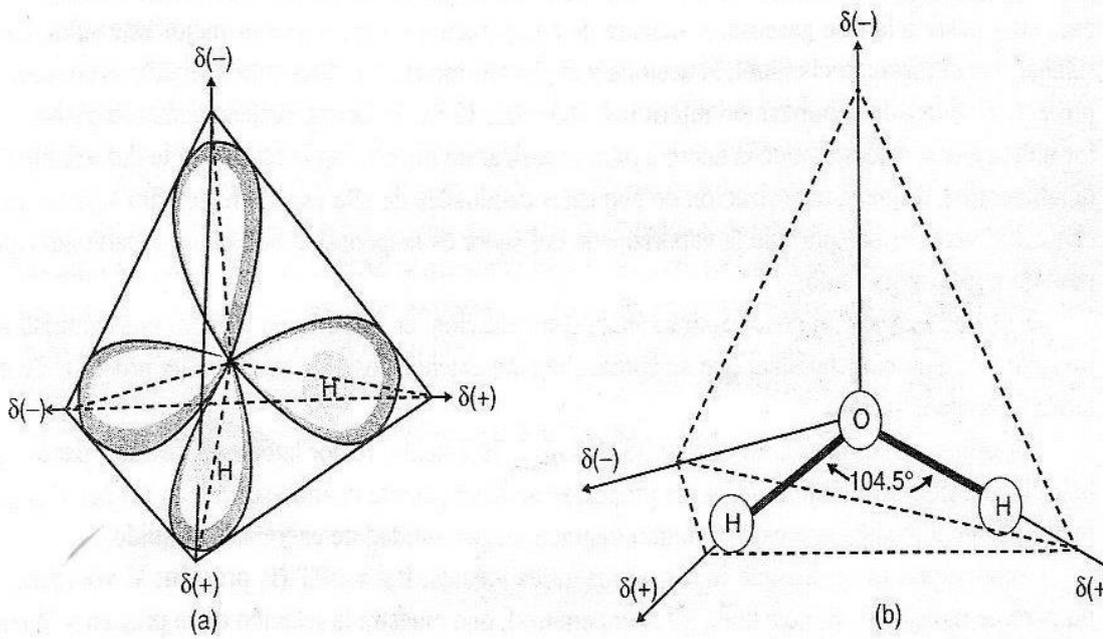


Figura 1: Estructura tetraédrica del agua (Fennema, 2000).

El agua contenida en un alimento, sea este de origen animal o vegetal, está más o menos disponible para participar en reacciones físicas, químicas y microbiológicas. Esta disponibilidad varía de un producto a otro según su composición, ya que algunas estructuras moleculares retienen más agua que otras; varía incluso para un mismo producto (Casp et Abril, 1999).

3.1.2. Tipos de agua en los alimentos

El término contenido de agua de un alimento se refiere, en general, a toda el agua presente en el mismo. Sin embargo, en los tejidos animal y vegetal el agua no está uniformemente distribuida por muchas razones, por ejemplo, debido a los complejos hidratados que se producen con proteínas (Badui, 1999), a los hidratos de carbono y otros, a las diversas estructuras internas propias de cada tejido, a los microcapilares que se forman, a su incompatibilidad con los lípidos que no permiten su presencia, etcétera.

Esta situación de heterogeneidad de la distribución de agua también se presenta en productos procesados debido a que sus componentes se encuentran en distintas formas de dispersión (Casp et Abril, 1999); por estas razones, en los alimentos existen diferentes estados en los que se encuentra el agua, es decir no toda el agua de un producto tiene las mismas propiedades fisicoquímicas, generalmente el agua presente en los alimentos se clasifica como agua libre, agua débilmente ligada o semi-ligada y agua fuertemente ligada, estas últimas son retenidas por la materia seca debido a la presencia de fuerzas relativamente importantes (Fellows, 1995).

En los productos más hidratados como la mayoría de las frutas y hortalizas, una parte importante del agua está bajo forma de agua libre y débilmente adsorbida, retenida por capilaridad en los tejidos del producto (Desrosier, 1998). En los productos más secos, como la mayoría de los cereales, según su textura y composición química, una parte importante del agua se encuentra fuertemente adsorbida por el producto (Badui, 1999). Como se puede observar

en la Figura 2, donde se aprecian tres zonas hipotéticas en las que se divide el agua contenida en un alimento.

La zona III se considera agua libre, esta se encuentra en macrocapilares y forma parte de las soluciones que disuelven las sustancias de bajo peso molecular, es la más abundante, fácil de evaporar y congelar, y su eliminación reduce el valor de a_w a 0.8 (Ibarz et Barbosa, 1998).

En la zona II, el agua se localiza en diferentes capas, más estructuradas y en microcapilares, es más difícil de quitar, pero al lograrlo se obtienen valores de a_w de 0.25, esta fracción corresponde al agua ligada; por último, el agua de la zona I equivale a la capa monomolecular y es la más difícil de eliminar en los procesos de secado, su presencia ejerce un efecto protector, sobre todo contra las reacciones de oxidación de lípidos, porque actúa como barrera del oxígeno (Franco, 1998).

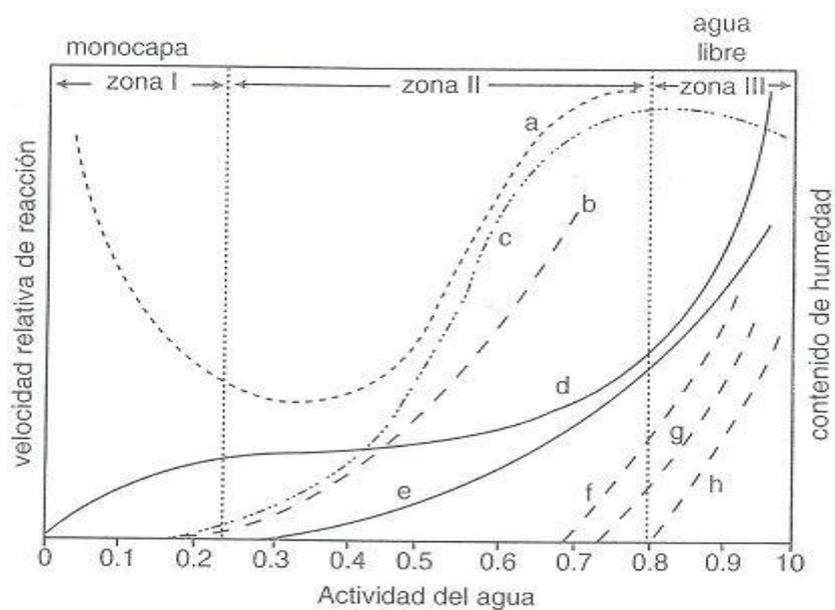


Figura 2: Diferentes zonas en que se divide el agua (Ibarz et Barbosa, 1998).

De acuerdo a esto, durante el proceso de deshidratación, se eliminan primero las moléculas menos ligadas, la fracción que se elimina en último lugar, corresponde a las moléculas de agua de estructura, fuertemente ligadas por uniones electrostáticas. El agua libre se comporta como agua pura, requiere por lo tanto para evaporarse relativamente poca energía (del orden de 2.4 KJ/Kg de agua libre), por el contrario la evaporación del agua ligada es más difícil y requiere más energía. Por lo tanto, la cantidad de energía necesaria para evaporar la misma cantidad de agua aumenta durante el secado, el último gramo de agua evaporada necesita más energía que el primero. En base a esto se sabe el comportamiento del agua en el alimento, mediante el cual podemos saber el tiempo y la temperatura a la cual someter dicho alimento, obteniéndose así los mejores productos.

3.2 Actividad del agua

Las propiedades reológicas y de textura de un alimento dependen de su contenido de agua, aún cuando éste también influye definitivamente en las reacciones de deterioro físico, químico, enzimático y microbiológico (Badger, 1965).

La forma en que se puede encontrar disponible el agua y su grado de libertad dentro de un producto, se conoce como actividad de agua (a_w ; Badui, 1999). La cual se define como la relación entre la presión parcial del agua en el alimento (P) y la presión de vapor del agua pura (P_0) a la misma temperatura.

La relación:

$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{\% HRE}{100}$$

Define la actividad de agua en el producto y su relación con la humedad relativa de equilibrio (% HRE) del medio (Desrosier, 1999).

a_w se define en relación a un estado de referencia, el agua pura, cuya actividad tiene un valor de 1, ya que si el agua se encuentra en estado libre, $p=p_0$. Si, por el contrario, el agua está ligada a un sustrato seco por fuerzas de unión físico-químicas se tendrá que $p < p_0$, su valor de actividad estará comprendido entre 0 y 1; teniendo un valor más pequeño cuando mayores sean las fuerzas de unión y, por el contrario, su valor tenderá a 1 cuando el agua se aproxima al estado libre, evaporándose como el agua pura al aire libre (Chang, 2002).

El valor de a_w de un alimento siempre es inferior a 1, lo cual significa que los constituyentes del producto fijan parcialmente el agua, disminuyendo así su capacidad de vaporización, a temperatura constante y bajo condiciones de equilibrio, existe una única relación entre el contenido de humedad y a_w (o la humedad relativa de equilibrio) de un alimento, dependiendo de si el equilibrio se alcance por adsorción o por desorción (Casp et Abril, 1999).

Esta relación se conoce como isoterma de equilibrio (Figura 3). a_w , disminuye al mismo tiempo que lo hace el contenido de agua (W), la curva, $W=F(a_w)$, es generalmente sigmoïdal (Barbosa et Vega, 2000).

Cabe destacar que el término a_w , tal como se ha definido, solo es válido en equilibrio. El intercambio dinámico de las moléculas de agua entre el alimento y su entorno resultará en una disminución neta del agua del alimento hasta que el potencial químico o a_w de los dos se igualen. La condición de equilibrio se alcanza cuando el número de moléculas de agua que entren y salgan del alimento sea igual (Badui, 1999).

La a_w puede medirse directamente determinando la presión parcial del vapor de agua en equilibrio con el alimento (Figura 4; Casp et Abril, 1999). Para comprender los diferentes tipos de interacciones entre las moléculas individuales de agua o entre toda el agua en un alimento real, es necesario primero analizar los mecanismos teóricos que deprimen la presión de vapor del agua; la curva que relaciona el contenido de agua de un producto con su a_w a temperatura constante (Figura 3) se divide en tres partes, dependiendo del

efecto que prevalezca en la a_w , esta división se debe a la porción pura del agua, a la condensación capilar o el efecto de soluto (Grau et al., 1999), estos segmentos se describen a continuación.

Intervalo: $0 < a_w < 0.2$: En esta primera parte el producto contiene muy poca agua, actúan fuerzas de Van der Waals muy intensas y las moléculas de agua presentes están ligadas a los puntos activos, como los grupos polares de las moléculas o formando puentes de hidrógeno.

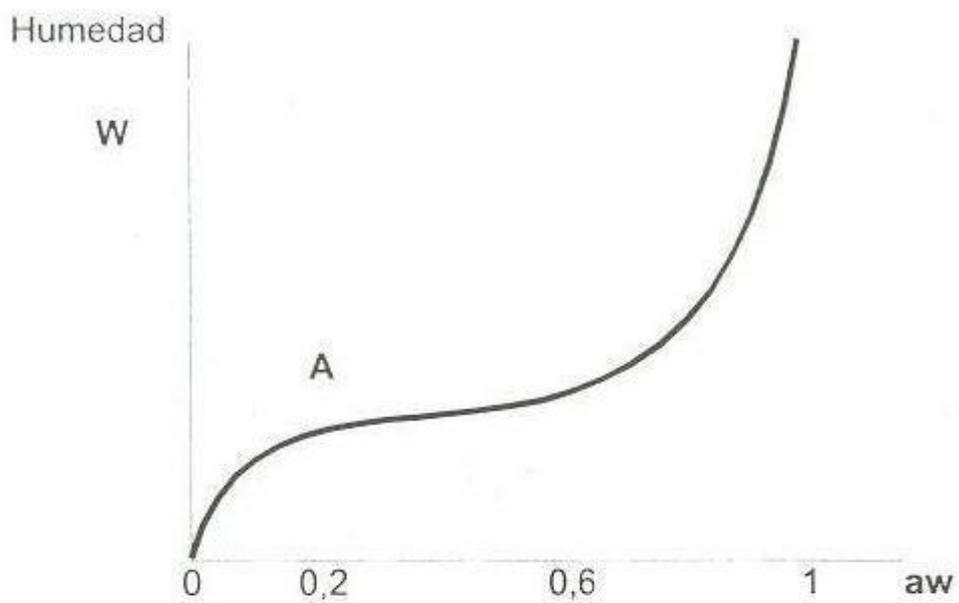


Figura 3: Isotherma de equilibrio en base de la actividad de agua (a_w) (Grau et al., 1999).

$$a_w (\text{alimento}) = a_w (\text{aire})$$

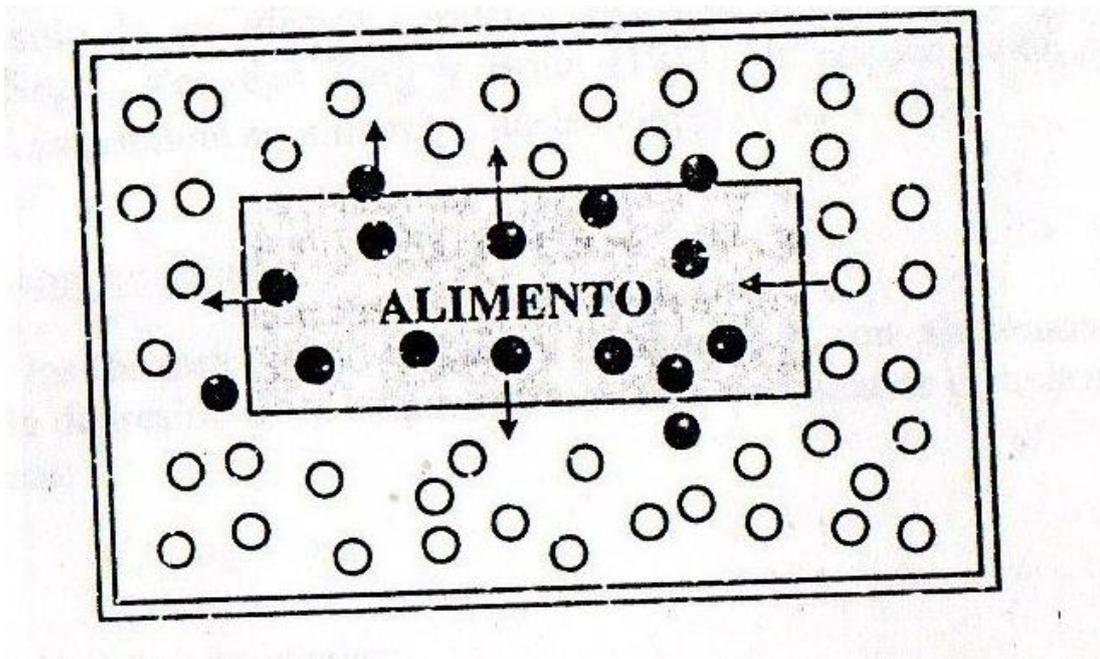


Figura 4: Diagrama esquemático ilustrando el movimiento de las moléculas de agua entre el alimento y su entorno (Casp et Abril, 1999).

representa teóricamente la adsorción de la primera capa de moléculas de agua se llama valor monocapa y esta generalmente alrededor de una a_w de 0.2-0.4 y por debajo de un contenido de humedad de 0.1 g de agua/g de sólido (Lobo,1997). Las moléculas orgánicas, particularmente las macromoléculas como proteínas, están más o menos saturadas por una capa monomolecular de agua estrechamente ligada. El agua se encuentra en estado rígido.

Intervalo $0.2 < a_w < 0.6$, parte central de la curva: El agua se encuentra bajo forma de capas polimoleculares que recubren parcialmente la superficie del sustrato seco, las moléculas de agua están ligadas más débilmente que las de la capa anterior.

Intervalo $a_w > 0.6$: El agua se encuentra en estado líquido y es retenida en la superficie del sustrato seco sólo por fuerzas de capilaridad. Es esta la única fracción de agua disponible para las reacciones químicas, enzimáticas, etc. En estas condiciones el crecimiento microbiano es la causa más importante de deterioro de los alimentos (Casp et Abril, 1999).

3.2.1 Factores que afectan a_w

La a_w en los alimentos puede ser disminuida por diferentes tipos de interacciones del agua con el sustrato no acuoso, interacciones con los solutos disueltos, formación de puentes de hidrógeno en puntos hidrofílicos del material soluble e insoluble, fuerzas capilares y otras fuerzas de dispersión de largo alcance en disoluciones, suspensiones o geles. Las cuales se describen a continuación (Arana, 1969):

- Interacción con los puntos activos:

Las interacciones superficiales (fenómenos de adsorción en la interfase sólido-líquido) entre el agua y los componentes de los alimentos juegan un papel importante en la disminución del a_w en situaciones de bajo contenido de humedad. Como resultado, la presión de vapor del agua disminuye considerablemente a bajos contenidos de humedad, como los correspondientes

a la humedad de la monocapa, la a_w se reduce tanto que no es posible el crecimiento microbiano ni el desarrollo de la mayoría de las reacciones químicas deteriorativas (Fennema, 2000).

- Fuerzas de largo alcance:

La unión del agua a puntos específicos de las proteínas por puentes de hidrogeno. Se ha descrito que cuando se encuentran en una a_w de 0.92, alrededor de seis moléculas de agua están asociadas con cada lado de la cadena polar disminuyendo así la a_w (Barbosa et Vega, 1999).

- Fuerzas capilares:

La condensación capilar juega un papel importante en la depresión de a_w . En la teoría de la condensación capilar, el volumen de agua retenida se considera como el necesario para llenar los poros o capilares del material. La presión de vapor del agua dentro del capilar queda deprimida, respecto al agua fuera del mismo, debido a que el menisco acuoso es siempre cóncavo (Grau et al., 1999).

El efecto del a_w se ha estudiado no solo para definir la estabilidad microbiológica del producto sino también por su influencia en las reacciones bioquímicas que se producen en el sistema, su relación con la estabilidad del alimento refleja el grado de interacción con los demás constituyentes, además que se relaciona con la formulación; el control de los procesos de deshidratación y de rehidratación, la migración de la humedad en el almacenamiento y muchos otros factores (Davies, 1975).

3.3 Métodos de conservación

La conservación de alimentos comprende aquellas acciones tomadas a fin de mantener los alimentos con sus propiedades deseadas o su naturaleza durante el mayor tiempo posible (Shafiur, 2006), los procedimientos utilizados para la conservación de alimentos se dirigen al control de microorganismos, a la reducción de reacciones enzimáticas; etc., por lo tanto se basan en la

intervención sobre los factores que afectan su actividad como: agua disponible, pH, potencial óxido –reducción, sustancias inhibidoras y temperatura.

Tomando en cuenta que cuando en el alimento existe un reducido número inicial de microorganismos, su conservación, por cualquier método que se utilizó, es más fácil que cuando su número es más elevado, de ahí la importancia que en la conservación se lleve a cabo una reducción de la contaminación y la aplicación de buenas prácticas de manufactura, la implementación de sistema de análisis de riesgos, identificación y control de puntos críticos (HACCP), ya que contribuyen de forma importante en el control y eliminación de microorganismos (Labuza et al., 2004).

Existe la posibilidad de utilizar métodos de conservación basados en más de uno de los principios antes mencionados, con lo cual se mejoran las posibilidades de conservación, incrementando la vida útil, o bien se podrá reducir la intensidad del tratamiento, permitiendo mantener las cualidades organolépticas del producto. Cabe mencionar que se puede controlar la presencia de microorganismos utilizando calor o frío, debido a que los microorganismos tiene intervalos óptimos para su desarrollo, por lo cual al utilizar adecuadamente el método basado en la temperatura se puede lograr la destrucción o inactivación de los mismos.

Otro método para la conservación de los alimentos esta basado en función de la cantidad del agua residual disponible y la forma de disminución de la disponibilidad de la misma, se puede conseguir mediante métodos físicos como son la deshidratación y la concentración por evaporación, por ejemplo: leche en polvo y jugos concentrados, respectivamente, o por medios químicos, adición de solutos, por ejemplo sal y azúcar (Roos et Karel, 1992).

3.3.1. Mecanismo de eliminación del agua

La eliminación del agua de un producto se puede conseguir por vía mecánica o vía térmica. La eliminación del agua por vía mecánica solo permite la

separación de una parte del agua libre de los productos tratados. Ningún procedimiento mecánico permite reducir la humedad de un producto más del 60%; precisamente el hecho de que solo se elimine una fracción del agua no ligada, implica un menor consumo de energía en los procesos de eliminación de agua por vía mecánica (Barbosa et Vega, 1999).

3.3.1.1 Eliminación del agua por vía térmica

Se trata de una operación de transferencia de masa, que requiere una activación previa del agua por una cierta cantidad de energía aportada por una transferencia de calor (Fito et al., 2000). Entre las técnicas de eliminación del agua por vía térmica se deben distinguir los procedimientos por ebullición de los procedimientos por arrastre. En el caso de la eliminación del agua por ebullición, se lleva el producto a una temperatura suficiente para que la presión de vapor del agua del producto sea igual a la presión del ambiente (Gould, 1995). El calor se aporta al producto por conducción a través de una superficie caliente, por convección a partir de vapor de agua recalentado o por la utilización de radiaciones. El agua evaporada del producto rodea la superficie del mismo en forma de una atmósfera de vapor de agua pura (Barbosa, 2000).

3.3.1.2 Mecanismo de transferencia de materia

Los sólidos que se deshidratan en la industria agrícola presentan un fenómeno de transferencia de masa complejo, el alimento que se somete a este proceso es un sistema trifásico; matriz sólida (Ms), fracción líquida (FL) y la fracción gaseosa o porosa (FG), pueden distinguirse varios mecanismos de transporte de materia según la fase a través de la cual se produce el transporte y según se trate de agua líquida, agua líquida más solutos o vapor de agua (Barbosa et Cánovas, 2000). Los mecanismos de transferencia de materia en el interior del sólido son: difusión de agua en forma de vapor o en fase líquida y capilaridad.

3.3.1.3 Mecanismos de transmisión de calor

El transporte de calor se origina hacia la interfase sólido-gas y a través del sólido (Badui, 1999). La transferencia de calor hacia la interfase puede realizarse por los tres mecanismos conocidos; convección, conducción y radiación, en algunos casos predomina alguno de ellos, mientras que en otros se combinan (Charley, 2001).

3.3.1.3.1 Conducción

Es cuando el calor se transmite a través de un cuerpo por transporte molecular, o por movimiento de moléculas individuales, sin que exista mezcla. La ecuación que interpreta el flujo unidireccional a través de un material cualquiera es la siguiente (Mari, 2002).

$$Q = -KA \frac{dt}{dl}$$

Y cuando el régimen es estacionario:

$$Q = \frac{K}{lA_m} (T_p - T_i)$$

Donde:

K: Conductividad térmica del material a través del cual se trasmite el calor (W/m °C).

T_P: Temperatura de la placa.

t_i: Temperatura de la interfase.

a_m: Área media a través de la cual se transmite calor.

l: Espesor de la placa a través de la que fluye calor.

El área media, A_m, de transmisión es perpendicular al flujo de calor y, el espesor, l, se mide paralelamente a él. La conductividad térmica de líquidos y

de gases es muy pequeña en comparación con la de los sólidos (Fito et Grau, 1998).

3.3.1.3.2 Convección

Cuando el calor se transmite por mezclas de las partes calientes con las frías de un mismo material, por movimiento de porciones macroscópicas de materia o racimos de moléculas, el mecanismo se conoce como convección o transporte turbulento de calor (Navarrete, 1999).

3.3.1.3.3 Radiación

Es la denominación que se da a la transmisión de la energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas. Si la radiación atraviesa un espacio vacío, no se transforma en calor ni en ninguna otra forma de energía y no es desviada de su camino; si se encuentra materia en este camino, la radiación será transmitida, reflejada o absorbida; únicamente la energía absorbida es la que aparece en forma de calor y su transformación es cuantitativa.

3.4. Técnicas de eliminación del agua

La desecación puede llevarse acabo por diferentes métodos mecánicos y físico-químicos como los que a continuación se describen:

Prensado: Se conoce también como compresión, consiste en separar un líquido de un sistema de dos fases, sólido-líquido, comprimiendo el sistema en condiciones que permiten fluir y salir al líquido, mientras el sólido queda retenido entre las superficies compresoras (Grau et al., 1999).

Centrifugación: Al aplicar calor a un material mojado y una fuerza centrífuga suficientemente elevada, el líquido contenido se desplaza en la dirección de la fuerza, produciéndose así una separación (Badui, 1999).

Evaporación superficial: Es cuando el producto se somete a la acción de una corriente de aire caliente, el líquido que contiene se evapora aumentando su contenido de aire; se produce así una desecación.

Ósmosis: Se presenta cuando un producto es sumergido en una solución concentrada de sal o azúcar, se produce un flujo de agua desde el interior de las células del alimento hacia la disolución más concentrada a través de una membrana semipermeable (Grau et. al., 2000). Esto se produce debido a una diferencia de potencial químico del agua en el alimento y en la solución que lo rodea.

Liofilización: En esta operación el líquido debe estar congelado, se separa del producto que lo contiene por sublimación (Rahman, 2001).

Absorción: Es una operación aplicada a gases en la que uno o varios componentes de una mezcla gaseosa se disuelven en un líquido.

Congelación: Cuando se congela una sustancia que contiene un líquido, éste se separa paulatinamente en forma sólida produciendo una concentración del material que contenía disuelto o cuando se encuentra en cantidades pequeñas, desecando el material (Fito et Grau, 2000).

3.4.1 Deshidratación

De todos estos métodos, el más utilizado es el de la evaporación superficial, conocido también como deshidratación por aire caliente (Casp et Abril, 1999). La deshidratación por aire caliente es una operación unitaria en la que el agua (en su totalidad o parte de ella), contenida en un sólido es transferida a un gas (aire caliente). Existen por lo tanto dos fases en el sistema sólido ó líquido hasta el seno del gas; dicho proceso constituye un fenómeno de transferencia de materia y de transmisión de calor simultaneo (Rahman, 2001).

La deshidratación es la operación mediante la cuál se elimina total o parcialmente el agua de la sustancia que lo contiene. Esta definición se aplica a sólidos, líquidos o gases (Fito et al., 2001). La mayoría de los productos agroalimentarios son sólidos, por lo que se define mejor la deshidratación como la operación básica por la que el agua que contiene un sólido o una disolución se trasfiere a la fase fluida que lo rodea, debido a los gradientes de a_w entre ambas fases (Figura 5).

El agua se elimina de los alimentos por medio de su difusión en fase líquida y/o vapor, a través de su estructura interior; al movimiento del agua líquida le seguirá su evaporación en algún punto del alimento (Fennema, 2000), para lo cual es necesario calor, la transmisión de calor tiene lugar en el interior del alimento y está relacionada con el gradiente de temperatura existente entre su superficie y la correspondiente a la superficie del agua en el interior del alimento. Si se suministra al agua suficiente energía para su evaporación, el vapor producido se transportará desde la superficie de éste; el gradiente de presión existente entre la superficie del agua en el interior y en el exterior al alimento (Casp et Abril, 1999), es el que provoca la difusión del vapor de agua hacia la superficie.

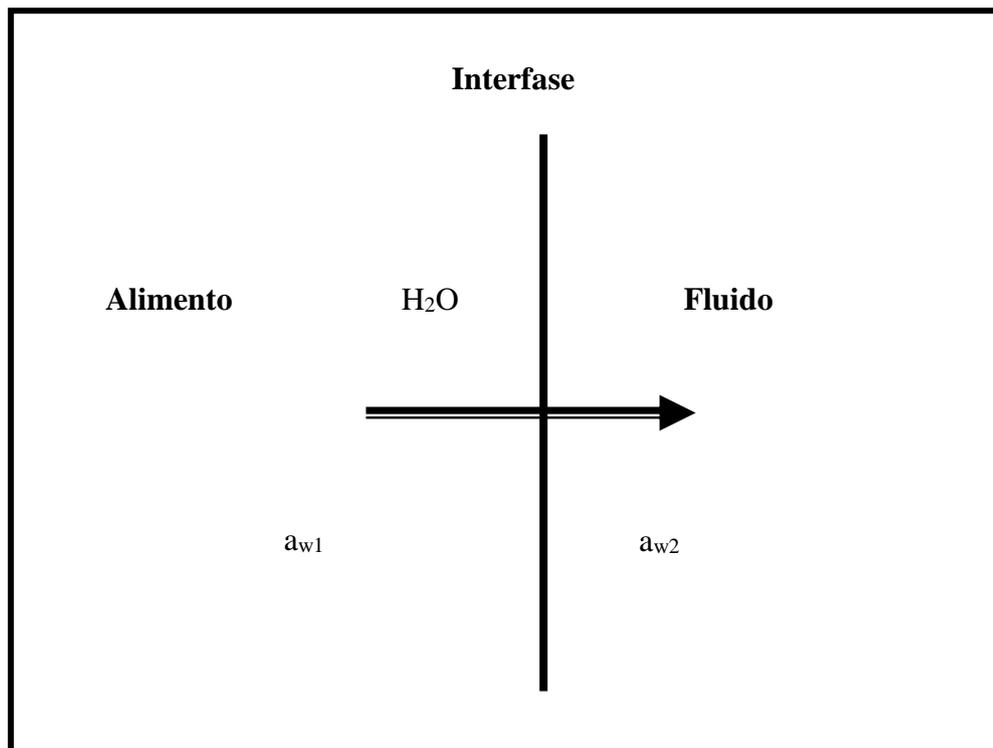


Figura 5: Esquema de las fases alimento-fluido entre las que se produce el transporte de agua durante la deshidratación debido a un gradiente de a_w . (Rahman, 2001).

Por lo tanto durante el proceso de secado se producen cuatro procesos de transporte (Figura 6; Barat et Albors, 2000).

1-Transmisión de calor desde el gas hasta la superficie del producto: Este tipo de transferencia puede realizarse por conducción, convección y radiación como se ha mencionado anteriormente.

2-Transmisión de calor desde la interfase sólido-gas hasta el interior del sólido: Este tipo sólo se puede tener por conducción.

3-Transmisión de materia a través del sólido: Se puede producir por difusión o por capilaridad. La difusión es debida a las diferencias de concentración y capilaridad, aprovechando los capilares existentes, la difusión tiene lugar en el secado de productos con humedades del orden de 25% (base húmeda) o inferiores, mientras que la capilaridad se presenta para niveles altos de humedad.

4-Transferencia de vapor desde la interfase sólido-gas hacia el seno de gas: Se utilizarán procesos basados en la convección, conducción o radiación desde la fuente de calor hasta el alimento. La transferencia de calor dependerá de la temperatura del aire, de su humedad, de su caudal, de la superficie expuesta del alimento y de la presión (Casp et Abril, 1999).

Los mecanismos por los que ocurre la migración de los componentes dentro de un sistema pueden ser muy complejos en los alimentos. No obstante el modelo clásico que describe la forma en la que la materia se transfiere a nivel molecular es el modelo de difusión molecular, descrito para el estado gaseoso, sobre la base de la teoría cinética de los gases y que constituye la base de los fenómenos de transporte (Kemp et al., 2001).

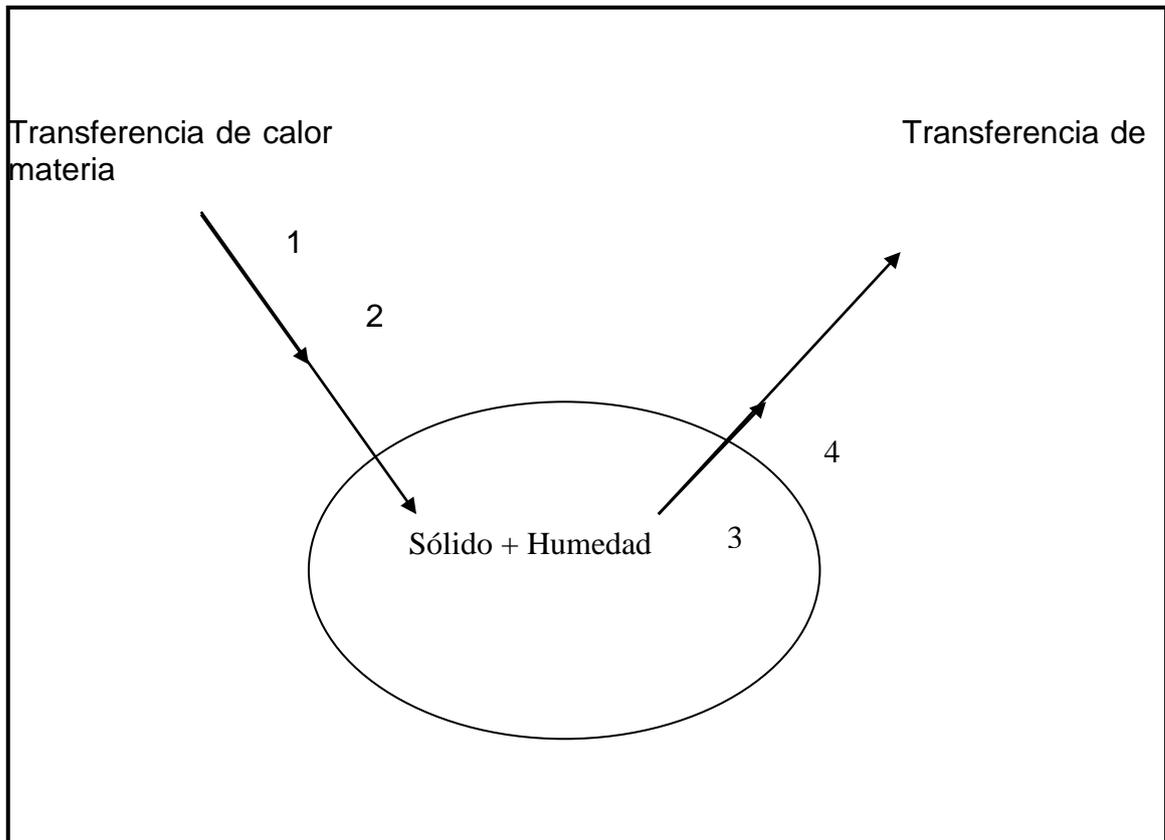


Figura 6: Proceso básico de secado
1) Transmisión de calor desde el gas hasta la superficie del producto. 2) Transmisión de calor desde la fase sólido-gas hasta el interior del sólido. 3) Transmisión de materia a través del sólido. 4) Transferencia de vapor desde la interfase sólido-gas hacia el seno del gas (Casp y Abril, 1999).

3.5 Cinética de secado

El secado se define como la eliminación de la humedad de un producto y en la mayoría de las situaciones prácticas la etapa principal durante el secado es la transferencia interna de materia (Chirife, 1983).

El contenido de humedad del producto se define como la relación entre la cantidad de agua en el alimento y la cantidad de sólidos secos y se expresa como:

$$X_t = (W_t - F_s)/F_s \quad \text{Ec. 9}$$

En la que W es el peso total de material en un tiempo determinado, siendo F_s el peso de los sólidos secos y X_t es la humedad expresada como peso de agua/peso sólido seco. Una variable muy importante es la denominada contenido de humedad libre X , la cual se evalúa si se considera el contenido de humedad en equilibrio:

$$X = X_t - X_{eq} \quad \text{ec. 10}$$

En la que X_{eq} es el contenido de humedad cuando se alcanza el equilibrio. Una curva típica de secado se obtiene al representar este contenido de humedad libre, X , frente al tiempo de secado (figura 7), la velocidad de secado, R , es proporcional al cambio del contenido de humedad en función del tiempo (t):

$$R \propto dX / dt$$

Considerando la curva representada en la figura 8, los valores individuales de dX/dt en función del tiempo, se pueden obtener a partir de la tangente trazada en la curva X frente a t . Sustituyendo la condición de proporcionalidad en la ecuación 9 por F_s/A , la velocidad de secado se puede expresar como (Geankoplis, 1993):

$$R = -(F_s/A) (dX/dt) \quad \text{Ec. 11}$$

Donde R es la velocidad de secado, A es el área de la superficie donde tiene lugar el secado. El proceso de secado de un material puede describirse por una serie de etapas en las que la velocidad de secado juega un papel determinante, la cual presenta generalmente 3 zonas principales que se describen a continuación:

Zona A: En la cual la pendiente de la curva aumenta ligeramente con el tiempo y se denomina periodo de inducción o de velocidad de secado creciente.

Zona B: En la cual se representa al periodo de velocidad de secado constante, donde la pendiente es constante.

Zona C: En la cual se representa el periodo de secado decreciente, donde la pendiente va disminuyendo con el tiempo. Se divide en dos periodos: periodo de velocidad decreciente y segundo periodo de velocidad decreciente (Figura 8).

3.5.1 Periodo de inducción o de velocidad de secado creciente (precalentamiento)

Es un periodo que transcurre mientras el producto y el agua contenida en el se calientan ligeramente, hasta alcanzar la temperatura de bulbo húmedo característica del ambiente secante (Rodríguez, 2002).

En el producto a secar, la velocidad de transferencia de masa es muy lenta. Por el contrario el gradiente de temperatura entre el aire caliente y la superficie fría del producto son elevadas, en consecuencia la transferencia de calor es alta (Norman, 1987).

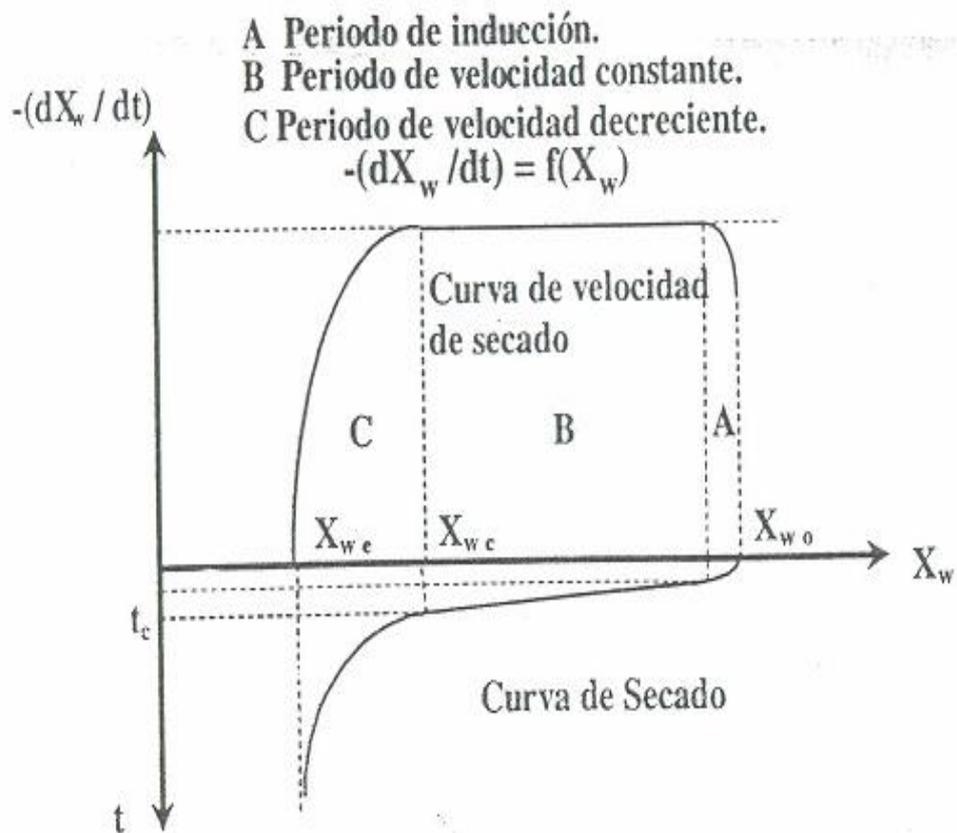


Figura 7: Curva típica de secado y de velocidad de secado (Geankoplis,1993).

La cantidad de calor transferido a la superficie del producto es netamente superior a la cantidad de calor arrastrado por la poca agua evaporada, existe un desequilibrio. El excedente de calor se utiliza entonces para calentar la superficie del producto, lo cual produce una disminución del gradiente de temperatura que desaparecerá cuando se alcance el equilibrio estacionario, este periodo es muy corto en comparación con el tiempo de secado (Xué et. al., 1998). En esta etapa se inicia el proceso de secado, de manera que el producto se calienta y aumenta la temperatura de la interfase, produciéndose una adaptación del material a las condiciones de secado.

Este periodo depende también de numerosos factores, su duración estará en función del contenido inicial de humedad del sólido, de su temperatura y la velocidad del aire de secado (Barbosa et Vega, 2000).

3.5.1.2 Periodo de velocidad de secado constante

En este periodo se produce una reducción importante del contenido de agua, el agua se elimina con un flujo másico constante. Durante este periodo, el flujo de calor intercambiado entre el aire y el producto se utiliza únicamente para la evaporación del agua; este periodo continúa mientras la superficie del producto este alimentada por agua libre liquida desde el interior, fundamentalmente por capilaridad (Desrosier, 1999).

Esta etapa finalizará cuando el contenido medio de humedad del producto alcance el valor de la humedad crítica. Por lo tanto, en la curva de secado este periodo deberá ajustarse a una recta (Figura 8). La humedad crítica no es una propiedad del alimento, sino que depende del tamaño de partícula y de las condiciones del aire de secado.

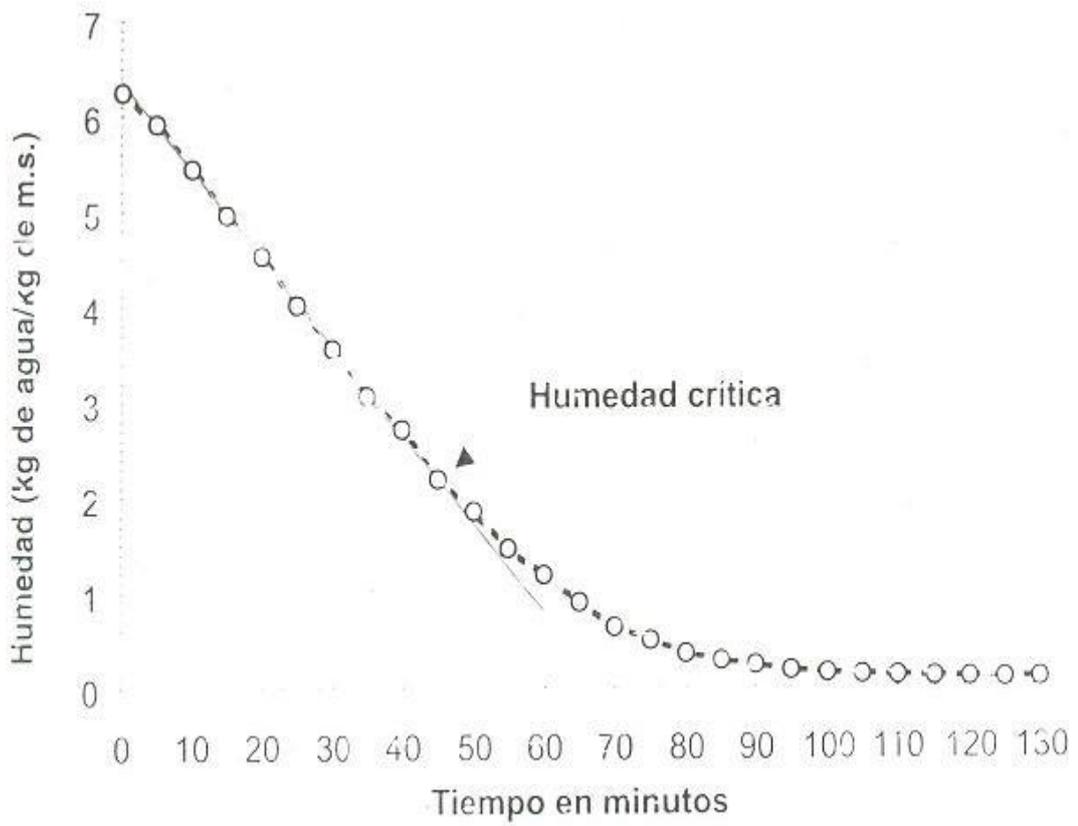


Figura 8: Periodo de velocidad de secado constante (Desrosier, 1999).

En el periodo de velocidad constante, el principal mecanismo de transporte de masa es el flujo capilar de agua líquida, aunque puede existir alguna difusión del líquido. El mecanismo interno de flujo de la humedad no afecta la velocidad de secado, es el entorno secante, el aire, el que impone la velocidad de secado que se incrementa al hacerle la temperatura. Lo mismo ocurre con la velocidad del aire de secado, cuanto mayor es ésta, mayor es la velocidad del secado (Norman, 1999).

El diámetro de los poros y de los capilares disminuye y la pérdida de peso es aproximadamente igual al volumen de agua evaporada. El flujo del agua líquida arrastrara solutos que se depositan en la superficie, sí no son volátiles, produciéndose el fenómeno conocido como *case hardening* que afecta a la eliminación del agua en los periodos posteriores. Cuando la superficie externa del producto deja de estar saturada, comienzan uno o varios periodos de velocidad de secado decreciente y la temperatura se incrementa continuamente desde el bulbo húmedo hasta la del fluido calefactor (Barbosa et Vega, 2000).

3.5.1.3 Primer periodo de velocidad decreciente

Este periodo comienza cuando la superficie del producto en contacto con el aire de secado alcanza el umbral de higroscopicidad (para materiales higroscópicos), al inicio de esta etapa, el frente de evaporación durante el secado se encuentra en la superficie del alimento, esta se desplaza hacia el interior a medida que comienza el primer periodo de velocidad decreciente. La brusca reducción de la superficie efectiva de transferencia debida a una disminución de la velocidad de secado y a que la migración del agua es cada vez más difícil, lo cual ocasiona como consecuencia que la transferencia de masa se convierta en el factor limitante, adicionalmente los depósitos de solutos obstruyen los poros, el agua ligada migra bajo forma de vapor y la distancia a recorrer por el frente de vapor es cada vez mayor, todos estos factores frenan rápidamente la transferencia interna del agua (Gould ,1995). El

mecanismo de transporte de masa en este periodo es la difusión de vapor, desde la zona de evaporación hasta la superficie del producto.

3.5.1.4 Segundo periodo de velocidad decreciente o periodo de velocidad final

En este periodo en el alimento no queda más que agua ligada que se elimina muy lentamente (difusión-sórcion), esta fase termina cuando el producto alcanza el contenido de humedad en equilibrio, el cual depende de las condiciones de secado (Grau, et al., 1999).

Los periodos de velocidad decreciente se aprecian claramente si se representa la velocidad de secado (dX/dt : variación de la humedad con respecto del tiempo) contra el contenido de humedad por encima del equilibrio.

3.6 Modificaciones producidas en el producto con la deshidratación

El secado aumenta la duración de la conservación del producto pero modifica su calidad, aspecto, textura, color y composición nutricional. Las degradaciones del producto están ligadas principalmente a la duración y temperatura de secado. Para cada producto se puede definir una temperatura máxima admisible que se recomienda no sobrepasar, muchas reacciones físico-químicas son activadas por la temperatura y en consecuencia el secado provoca una aceleración de estas reacciones (Ibarz et Barbosa, 2000).

Estas transformaciones son inevitables, pero según la composición del alimento y los parámetros de secado, se favorecen unas reacciones y se limitarán otras. Es importante conocer que reacciones van a constituir el factor predominante de la alteración, con el fin de ajustar mejor las condiciones del tratamiento de conservación.

Entre las principales alteraciones observadas en los productos deshidratados se encuentran: el valor nutricional (carbohidratos, lípidos, proteínas), cambios en la estructura, el color y la actividad enzimática (Rodríguez et al., 2002).

3.6.1 Influencia del secado sobre el valor nutricional

En el secado, un alimento pierde su contenido de humedad, lo cual resulta en un aumento en la concentración de nutrientes en la masa restante. Las proteínas, las grasas y los carbohidratos están presentes en mayor cantidad por unidad de peso en los alimentos secos que en fresco (Mazza, 2000).

Lípidos: La oxidación de los lípidos es la responsable de la rancidez, del desarrollo de malos olores y de la pérdida de vitaminas liposolubles y pigmentos de muchos alimentos, especialmente en los deshidratados. Los factores que influyen en la velocidad de oxidación son además del contenido de humedad, el tipo de sustrato (ácido graso), el contenido de oxígeno, la temperatura, la presencia de metales y de antioxidantes naturales, la actividad enzimática, el contenido de proteínas y de aminoácidos libres y otras reacciones químicas (Casp et Abril, 1999).

Desde un punto de vista de la conducción de la deshidratación, se limitará la aparición de estas reacciones de oxidación con un secado:

- A altas temperaturas (la formación de corteza y el pardeamiento no enzimático son los factores limitantes)
- Llevando al producto a valores de a_w entre 0.2 y 0.5.

La eliminación del oxígeno del alimento puede reducir la oxidación, aunque las cantidades necesarias para que se produzca esta oxidación son muy bajas. El efecto del oxígeno en la oxidación de los lípidos está íntimamente relacionado con la porosidad del producto, los productos liofilizados son más susceptibles porque son más porosos (Yúfera, 1998).

Proteínas: El valor biológico de las proteínas deshidratadas depende del método de secado. Las exposiciones prolongadas a altas temperaturas pueden hacer a las proteínas menos útiles en la dieta, esto es debido a la desnaturalización de las mismas, especialmente las de las membranas, lo cual reduce la rehidratación (Badui, 1999).

Carbohidratos: las frutas son generalmente fuentes ricas de carbohidratos, la principal causa de deterioro en las frutas son los carbohidratos, la decoloración puede ser debida al obscurecimiento no *enzimático*, conocida también como *reacción de Maillard*.

La reacción de Maillard es el resultado de sustancias reductoras, primariamente azúcares, que reaccionan con proteínas o con grupos amino libres. Esta reacción cambia tanto las propiedades químicas como fisiológicas de las proteínas. En general la acumulación de pigmentos de color marrón indica que la reacción se ha producido en alimentos que contienen hidratos de carbono y proteínas (Toledo, 1998).

Vitaminas: En los alimentos deshidratados hay pérdidas de vitaminas, su grado de destrucción dependerá del cuidado con que se haya llevado la preparación del producto para su deshidratación, el proceso de secado seleccionado y del cuidado en su ejecución; las pérdidas de tiamina se producen durante el procesado, siendo mayores cuanto más alta es la temperatura de secado, también se conocen pequeñas pérdidas de riboflavina y niacina ; la vitamina C desaparece en su mayor parte, ya que el ácido ascórbico es sensible a las altas temperaturas en condiciones de humedad alta (Casp et Abril, 1999).

3.6.1.2 Influencia del secado sobre el color

El color es una de las características organolépticas que definen la calidad y aceptabilidad de los productos frutihortícolas deshidratados, es un atributo

económicamente tan importante que ha dado origen a una ciencia y toda una línea de equipamiento para lograr hacer mediciones objetivas en el producto.

El color en los alimentos varía también con el secado, el color depende de las circunstancias bajo las cuales es visto el alimento y de la capacidad de su superficie para reflejar, dispersar, absorber o transmitir luz visible. Dado que el secado cambia las propiedades físicas y químicas del alimento, es de esperar que modifique su capacidad para dispersar, absorber y transmitir la luz, y por lo tanto se modifique su color (Grau et al., 2000).

El secado modifica los colorantes naturales de los alimentos, por ejemplo los carotenoides son pigmentos liposolubles presentes en las hojas verdes y en los vegetales rojos y amarillos, su estructura química insaturada los hace susceptibles de los mismos tipos de degradación que los lípidos, estas alteraciones son mayores cuanto más alta es la temperatura y más largo el tratamiento de secado, otro grupo importante que se ve afectado en el proceso de secado es el grupo de las betalainas, las cuales son alcaloides derivados de la tirosina, estas pueden ser de dos tipos, las betacianinas que proporcionan el color rojo-violáceo y las betaxantinas que proporcionan el color anaranjado, las betacianinas son las que al ser expuestas a determinadas temperaturas, se acelera su hidrólisis, dando origen al ácido betalámico, el cual es incoloro, y a otros productos de color marrón (Ocampo, 2006).

3.6.1.3 Influencia del secado en la estructura del producto

El tejido celular animal o vegetal, en estado vivo presenta un estado de turgencia típica. Las paredes celulares están bajo tensión y el contenido bajo compresión, la pared celular posee una resistencia y elasticidad que la hace capaz de admitir determinados esfuerzos y volver después a su estado original. Pero superado un cierto límite, la modificación de la estructura se hace irreversible, al cesar la fuerza causante de la deformación, la célula no regresa a su estado original libre de tensiones (Shafiur, 1999). Este tipo de deformación

plástica se produce, en mayor o menor medida, cuando se desecan los tejidos vegetales o animales.

En la Figura 9 se pueden apreciar los cambios que se producen durante el secado de las piezas vegetales, se toma una pieza en forma de cubo, que esta en condición de turgencia. El contenido celular está sometido a presión y la membrana celular esta bajo tensión, si se expone este cubo a una corriente de aire caliente, el primer efecto es la evaporación de agua desde la superficie húmeda (Maldonado, 2005). La concentración de solutos en la superficie aumenta, el agua de las soluciones diluidas de las capas más profundas se mueve hacia la superficie a través de las paredes celulares, como consecuencia del gradiente de concentraciones, esta pérdida de fluido celular provoca una contracción del volumen de la célula (Ortega, 1979).

La primera etapa en la contracción de los tejidos es la depresión de la capa superficial de las células, produciéndose un encogimiento hasta un núcleo húmedo e incompresible. A medida que prosigue el secado, las células de las capas superficiales se aplastan cada vez mas, el cubo pierde los ocho vértices que se transforman en cantos redondeados (Desorier, 1998).

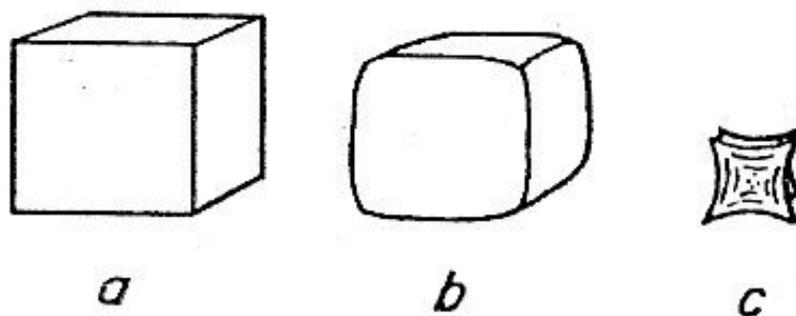


Figura 9: Cambios en la morfología de cubos de hortalizas durante la desecación (Barbosa et Vega,2000).

El encogimiento o contracción empieza a manifestarse en toda la pieza, los ocho vértices del cubo se habrán secado y endurecido, mientras que el centro permanece húmedo y plástico; si las condiciones de secado son lo suficientemente suaves para que las superficies no estén mucho más secas que el centro, la pieza se contraerá con la mínima distorsión en su forma, sin embargo, si las condiciones iniciales de secado son rigurosas, las capas superficiales se secarán hasta alcanzar una rigidez y resistencia mecánica, mientras el interior de la pieza todavía permanece húmedo y con poca resistencia; bajo estas circunstancias el volumen final de la pieza esta prácticamente fijado cuando su humedad media es todavía alta (Alzamora,1998).

El resultado es que el tejido se resquebraja o rompe internamente por uno o varios sitios y se arruga, las grutas internas se abren cada vez más (Rodríguez, 2002). Una consecuencia de este efecto es que la densidad global de un producto deshidratado está influida de forma importante por las condiciones de secado.

Si la temperatura del aire de secado es alta y su humedad relativa baja, hay peligro de que la humedad de la superficie del producto se elimine más rápidamente de lo que puede hacer la difusión del agua en el interior del alimento, produciéndose entonces lo que se llama *case harning* (endurecimiento en caja), este fenómeno se evita controlando la humedad relativa del aire circulante y su temperatura (Pérez, 1997).

Estas modificaciones de la estructura de los productos afectan a su textura, el color, además coagula las proteínas del protoplasma y destruye las propiedades de las paredes celulares, perdiéndose la turgencia de los tejidos.

3.7 Ley de Fick.

La difusividad o coeficiente de difusión de un componente A, a través de B está relacionada con el flujo de materia y sus gradientes de concentración a lo largo

de una dirección Z. La primera Ley de Fick (Ec.1), para la dirección Z y el coeficiente de difusión constante, establece que (Treybal, 1988):

$$J_A = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z} \quad \text{Ec. 1}$$

El signo negativo indica que la difusión ocurre en la dirección de una caída de concentración. El coeficiente difusivo es característico de la sustancia y de las condiciones de presión, temperatura y concentración del medio. El perfil de concentración solo cambia en la dirección de Z.

De forma similar, para la difusión de A en B, en donde existe un gradiente de concentración a lo largo de la dirección de difusión, se aplica la segunda Ley de Fick que, para difusión unidireccional a lo largo de Z y con coeficientes de difusión establece que (Treybal, 1988):

$$J_A = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \quad \text{Ec 2}$$

Las ecuaciones 1 y 2 son útiles en la descripción de fenómenos difusivos en los alimentos, si bien la ecuación 2 es más utilizada debido a que la naturaleza del fenómeno de transferencia es tal, que los sistemas en los que existe un gradiente de concentraciones constantes con respecto a la distancia son resueltos por medio de coeficientes locales y globales de transferencia. La ecuación 2 ha sido resuelta para los casos de geometrías definidas (Crack, 1975).

3.7.1 Solución de la ecuación de Fick para distintos sistemas

A partir de la ecuación de velocidad (primera Ley de Fick) y realizando un balance de materia en el sistema en estado no estacionario, se llega a la segunda ley de Fick (Ec. 2) que describe en forma diferencial la relación entre

la concentración y el tiempo en un punto dado del sistema (Martínez et al., 1998).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad \text{Ec 3}$$

Las diferentes soluciones de la ecuación 3, se han obtenido con condiciones frontera definidas en función de las diferentes geometrías y concentraciones iniciales (Martínez et al., 1998).

La integración se ha realizado para distintas geometrías del sistema y dimensiones con flujo unidireccional, esferas, placas y cilindros (Martínez et al., 1998).

A partir de la segunda ley de Fick, es posible obtener modelos semi-empíricos para determinar el coeficiente de difusión efectivo en geometría de placa fina y con diversas condiciones de contorno y de operación (Crack, 1985).

Durante el secado convectivo, con velocidad del aire suficientemente elevada, la resistencia externa es generalmente muy pequeña y la velocidad de secado es controlada por la difusión en el sólido. En estas condiciones, durante el periodo de velocidad decreciente, la humedad en la superficie esta en equilibrio con el medio y no hay agua libre (Maldonado, 2005).

Considerando que la distribución inicial de humedad es uniforme ($X = X_0$ en $t = 0$) y que la superficie esta en equilibrio con el medio de secado ($X = X_e$ en $X = \pm L/2$). La solución de la ecuación de Fick es la siguiente:

$$E = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left\{-\frac{\pi^2 (2n+1)^2 D t}{L^2}\right\} \quad \text{Ec 4}$$

Donde:

E =Concentración adimensional de humedad

L =Espesor de la placa

X_0 = Contenido inicial de humedad

X_e =Contenido de humedad en el equilibrio

La ecuación 4 describe la evolución temporal de la humedad media de un cuerpo sometido a secado, se obtiene por integración en el espacio de la solución de la segunda ley de Fick con las siguientes consideraciones: Geometría de placa infinita, transferencia unidireccional de masa, coeficiente efectivo de difusión constante, distribución inicial de humedad uniforme, la resistencia externa convectiva es mucho menor que la resistencia difusional interna, lo que permite suponer un contenido de agua en la interfase constante e igual al valor de equilibrio con el aire circundante, condiciones externas (velocidad, temperatura y humedad relativa del aire) constantes (Crack, 1975). No se considera retracción del sólido debido al cambio de volumen durante el secado, difusión de un solo componente a través del sólido (Santos et.a. 2000).

Una simplificación usual es utilizar una solución asintótica de la ecuación 4 que consiste en reducir la serie infinita al primer término, debido a que los términos superiores se hacen mas pequeños para los tiempos largos (Wiley, 1994).

$$E = \frac{8}{\pi^2} \exp\left\{-\frac{\pi^2 Dt}{L^2}\right\} \quad \text{Ec. 5}$$

Esta última ecuación se puede ocupar para el cálculo de la difusión efectiva del agua en los alimentos a partir de datos de cinética de secado, la difusión de agua (D) es sustituida por la difusión efectiva de agua (D_{efw}) (Martínez et al., 1998). Utilizando las leyes de los logaritmos se obtiene:

$$\ln E = \ln \frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \ln \frac{8}{\pi} - \frac{D_{efw} \pi^2}{L^2} t \quad \text{Ec. 6}$$

Donde L es el espesor de placa cuando el secado se realiza por ambas superficies, si no se lleva a cabo de esta forma, el valor de L se sustituye por $2L$ en la ecuación 6 (Askeland, 1987).

A partir de la ecuación de la pendiente se resuelve la D_{efw} :

$$D_{efw} = -\frac{L^2 m}{\pi^2} \quad \text{EC. 7}$$

Para resolver esta ecuación primero se tiene que determinar el contenido adimensional de humedad del material (E) (Askeland, 1987).

$$E_0 = \frac{X_{0t} - X_e}{X_0 - X_e} \quad \text{Ec.8}$$

El coeficiente de difusión en función de la temperatura, de la presión y del estado local del sistema en términos del gradiente de concentración. Por lo consiguiente varía de unos puntos del sistema a otros, ya que cambia el gradiente. La difusividad en función de la temperatura y el contenido de humedad.

3.8 Betabel

Es una planta de la familia de las *Chenopodiaceae* (*Quenopodiaceae*), se le conoce comúnmente como remolacha de mesa, betarraga o remolacha roja, su nombre científico es *Beta vulgaris*, de la cual existen variedades como la rosa, la blanca, pero la más común e importante es la roja (Toledo, 1980).

Es de cultivo anual, sus raíces se dividen en 4 clases, achatadas, ovaladas, semi-largas y largas cónicas; de acuerdo con su color las raíces se dividen en rojas y amarillas, la más cultivable es la variedad de color rojo.

La inflorescencia esta compuesta por una larga panícula, las flores son sésiles y hermafroditas, pudiendo estar solas o en grupos de 2 a 3, el cáliz es verdoso y de 5 sépalos, la corola de 5 pétalos, hay 5 estambres opuestos a los sépalos, el ovario es tricarpelar , los periantos de un grupo de flores que nacen en una sola axila se funden formando un glomérulo multigermico, que cuando se pone a germinar produce varias plántulas (cada glomérulo contiene de 2 a 6 semillas muy pequeñas en forma de munición o de frijol pequeño, de color café (Garza, 1976).

Las hojas son alternas, enteras, ovaladas triangulares en la base, variando de color verde a rojizo con pecíolo casi siempre alargado, ensanchado en la base de color rojizo o púrpura.

La parte comestible es la raíz, pero se ha comprobado que se trata de un hipocotíleo ensanchado, su color puede ser rojo o morado, debido al pigmento llamado betalaína; los cuales son compuestos nitrogenados solubles en agua, localizados en la vacuola de las células y son alcaloides derivados de la tirosina, se dividen en: betacianinas, que proporcionan el color rojo-violáceo, y las betaxantinas, que proporcionan el color anaranjado (Garza, 1976), las betacianinas, químicamente, son estructuras que contienen al ácido betalámico, las cuales, al ser expuestas a determinadas temperaturas, se acelera su hidrólisis, dando origen a la separación del ácido betalámico, el cual es incoloro, y también a otros productos de color marrón (Badui,1999).

3.8.1. Composición química de betabel

Los principales componentes del betabel son mayoritariamente el agua, los carbohidratos, las proteínas y algunos elementos que tienen importancia en la alimentación humana, principalmente por su poder antioxidante y su cantidad de hierro, el cual tiene efecto en los eritrocitos, los cuales al incorporar betalaínas en el torrente sanguíneo, evitan su hemólisis oxidativa, teniendo así un efecto antianemico, también tiene un efecto sobre la presión arterial, esto se demostró en estudios realizados por Stintzing et al, (2008) estos indicaron que

al ingerir medio litro de jugo de betabel al día, reduce la hipertensión arterial, esto es debido a que el jugo al mezclarse con la saliva se transforma en nitrito, el cual es transformado por el ácido clorhídrico del estómago en óxido nítrico.

Tabla 1: Composición Química del betabel

Composición Química del Betabel			
Agua (g)	87.3	Fosforo(mg)	335
Proteínas (g)	2.1	Hierro(mg)	1.5
Carbohidratos totales(g)	8.3	Zinc(mg)	0.4
Grasas(g)	0.2	Vitamina A.Equiv.totales(mg)	2.0
Cenizas(g)	2.1	Tiamina (mg)	0.02
Acidos grasos monoinsaturados	44	Riboflavina(mg)	0.05
Sodio(mg)	60	Niacina(mg)	0.3
Potasio(mg)	335	Vitamina C(mg)	20.0
Calcio(mg)	21		

Fuente FAO, *fruti and vegetable .agricultural services bulletin 119.*

3.8.1.2 Producción Nacional de Betabel

Para el cultivo de betabel se recomiendan suelos de textura arenosa o migajón arenoso, los climas que se recomiendan para su cultivo son los templados, aunque también pueden cultivarse en climas cálidos, pero en este tipo de climas la calidad es menor; las temperaturas frescas mejoran el contenido de azúcar, el color interno y la textura de las raíces, por el contrario los climas cálidos y secos no son adecuados para su cultivo, ya que se presenta transpiración hasta el punto de sobrepasar la absorción y sobrevenir la marchites (Valadez et Castillo, 1998).

Por tal motivo este tipo de hortaliza se puede cultivar en una amplia variedad de suelos y climas, por lo que esta hortaliza es atractiva como alimento por sus propiedades y por que su cultivo es relativamente fácil, los principales estados que producen este tipo de cultivo se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Producción Nacional de Betabel

DELEGACIÓN	SUPERFICIE	SUPERFICIE	PRODUCCIÓN (TON)	RENDIMIENTO (TON/HA)	PRECIO	VALOR DE LA
	SEMBRADA	COSECHADA			MEDIO	PRODUCCIÓN
	(HA)	(HA)			RURAL	(MILES DE \$)
					(\$/TON)	
PUEBLA	371.00	349.00	6,813.00	19.521	1,886.25	12,851.04
JALISCO	195.00	195.00	5,265.00	27.000	1,606.30	8,457.17
MEXICO	44.00	44.00	903.4	20.532	2,244.52	2,027.70
BAJA CALIFORNIA	56.00	55.00	891.56	16.210	7,875.70	7,021.66
GUANAJUATO	36.30	36.30	402	11.074	2,759.45	1,109.30
MICHOACAN	16.50	16.50	341.85	20.718	2,494.39	852.71
SONORA	35.00	35.00	306	8.743	3,098.04	948.00
TLAXCALA	15.00	15.00	291	19.400	3,216.84	936.10
SAN LUIS POTOSI	27.00	19.00	152	8.000	1,334.21	202.80
Región Lagunera	12.00	12.00	134	11.167	1,600.00	214.40
DISTRITO FEDERAL	8.00	8.00	112	14.000	4,000.00	448.00
COAHUILA	2.50	2.50	83.5	33.400	2,455.09	205.00
DURANGO	2.50	2.50	70	28.000	6,000.00	420.00
AGUASCALIENTES	3.00	3.00	48	16.000	1,993.75	95.70
CHIHUAHUA	5.00	5.00	45	9.000	1,850.00	83.25
TOTAL	828.80	797.80	15,858.31	19.878	2,262.08	35,872.83

FUENTE: Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA.2004

OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

- Modelar la cinética de secado del betabel utilizando la segunda ley de Fick.

4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar experimentalmente el secado del betabel en función de la temperatura de secado.
- Modelar la cinética de secado usando la segunda ley de Fick.
- Determinar los coeficientes de difusión efectiva del agua.
- Evaluar los cambios de color en el betabel durante el proceso de secado a las diferentes temperaturas utilizadas.

METODOLOGÍA

Para los fines de este proyecto de investigación, se estudiaron las condiciones de secado y el proceso de degradación de color del betabel (*Beta L. vulgaris*), empleando el material del Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, el cual se indica a continuación:

- Procesador de alimentos marca Moulinex
- Estufa con recirculación de aire forzado Oven series 9000, Thermolyne
- Balanza de alta precisión Ohaus modelo Explorer pro con capacidad de 410 g (Ohaus, E.U.A.).
- Termobalanza de alta precisión modelo MB 45 Halogen Moisture Anallalyzer con capacidad de 500 g (Ohaus, U.S.A.).
- Vernier mecánico de 20 cm de longitud marca Digimatic Caliper CD-8 CSX
- Colorímetro
- Microscopio de luz
- Charolas de aluminio
- Desecador
- Computadora
- Puerto serial RS232
- Base de madera

5.1 Cortado del betabel

Para esta operación se utilizaron 3 betabeles de diferentes establecimientos de Campestre Villas del Álamo, de un tamaño uniforme y color característico, los cuales se rebanaron en el procesador de alimentos, ocupándose solo aquellas que presentaban un área circular de 4cm. y un espesor de 2 mm. para obtener estos datos, se utilizó el Vernier mecánico de 20 cm de longitud.

5.2 Secado del betabel

Las muestras de betabel se colocaron en una charola de aluminio y fueron colocadas en una estufa con recirculación de aire forzado (Oven series 9000, Thermolyne), donde se colocaron de manera que la superficie fuera expuesta a la corriente de aire de secado, la pérdida de peso se registró usando la termobalanza la cual estaba conectada a una computadora personal de escritorio para establecer comunicación directa por cable (Hyper Terminal), utilizando un puerto serial RS232, registrando también temperatura y tiempo.

5.2.1 Contenido de humedad del betabel

El contenido de humedad de betabel al inicio del proceso se determinó empleando el método No. 934.06 de la AOAC (1990), basado en el principio de sequedad y gravimetría. Este proceso se realizó por triplicado, utilizando la siguiente expresión:

$$\% \text{Humedad} = \frac{(P_i - P_2)}{P_i} * 100$$

Donde:

P_i: Peso inicial de la muestra (g)

P₂: Peso final de la muestra (g)

5.3 Modelado de las curvas de secado de betabel

La representación del contenido de humedad frente al tiempo transcurrido permitió obtener las curvas de cinética de secado. Para describir estas graficas se utilizó el modelo disfuncional empleando la segunda ley de Fick. Los parámetros del modelo fueron obtenidos mediante ajuste de curvas de secado experimentales, en las diferentes condiciones de operación y temperatura (60,

65, 70,75 y 80⁰ C). La validez del modelo fue evaluada por medio de los valores del coeficiente de correlación.

5.3.1 Calculo de la velocidad de secado del betabel

La velocidad de secado se define como la cantidad de agua que se consigue eliminar por unidad de tiempo y de área. Para determinar la velocidad de secado se calculó primero el porcentaje de sólidos secos presentes en la muestra.

Posteriormente se calcula el contenido de humedad inicial, así mismo se determina la cantidad de humedad en equilibrio, la cual se define como el contenido de agua presente en la muestra al final del proceso de secado, es decir, la cantidad de agua presente en la muestra cuando el proceso de secado ha alcanzado una condición de equilibrio con el medio circundante.

Es necesario también para el cálculo de la velocidad de secado conocer el contenido de agua libre, la cual se define como el agua en exceso con relación a la humedad de equilibrio; se calculo por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Agua Libre} = W_{\text{exceso}} - X_{\text{equilibrio}}$$

Donde:

Agua libre= g de agua / g sólidos secos

W_{exceso} = agua en exceso

$X_{\text{equilibrio}}$ = Humedad en equilibrio

Humedad en equilibrio: Es cuando la humedad del sólido esta en equilibrio con el gas. Mediante estos datos se calculo la velocidad de secado usando la siguiente ecuación:

$$R = \frac{W_{SS}(X_{x1} - X_{x2})}{A(t_{x1} - t_{x2})}$$

Donde:

$R = \text{g H}_2\text{O} / \text{s cm}^2$

W_{SS} : masa del sólido seco

W_{x1} : Agua libre en el tiempo 1 en segundos

W_{x2} : Agua libre en el tiempo 2 en segundos

T_{x1} : tiempo 1 en segundos

T_{x2} : tiempo 2 en segundos

A : Área de secado: El promedio de las 3 mediciones del diámetro se utilizó conjuntamente con la fórmula para calcular el área de una circunferencia.

$$A = 4\pi * r^2$$

5.3.2 Coeficiente de difusión efectiva del agua (D_{efw}) del betabel:

Para el cálculo del coeficiente de difusión de agua, se obtiene primero el contenido adimensional de humedad, el cual se calculó por medio de la siguiente ecuación:

$$E = \frac{X_{t(n)} - X_{equilibrio}}{X_0 - X_{equilibrio}}$$

Donde:

E = Contenido adimensional de humedad

$X_{t(n)}$ = humedad en el equilibrio en segundos

X_0 = Humedad inicial

Todos los análisis estadísticos (ANOVA de una sola vía y comparación de medidas) se realizaron empleando el software Statistica versión 6.0 para Windows (Statsoft, 2000).

5.4 Determinación de color y de la estructura durante el secado de betabel

Para este procedimiento se utilizaron 3 diferentes betabeles los cuales fueron cortados de forma homogénea, se colocaron en bandejas de aluminio en la

estufa con recirculación de aire y se les tomaron los valores de L , a y b sistema Hunter donde L corresponde a claridad y a y b a la cromaticidad, el valor de a se define como rojo-verde, rojo para valores positivos y verde para negativos, b define el componente amarillo-azul, amarillo para valores positivos y azul para negativos y L corresponde a luminosidad (claridad), correspondiente a valores de 0 a 100.

Esto se realizó desde el inicio hasta el final del proceso, tomando lecturas cada 15 minutos a cada una de las diferentes temperaturas utilizadas (60, 65, 70,75 y 80° C). Los valores establecidos de L , a y b que se tomaron de referencia son los siguientes:

L : 93.56

a :-1.09

b :-0.2

Posteriormente se calcularon los valores de ΔL , Δa y Δb con las siguientes formulas:

Cálculo de: $\Delta L = L_m - L_e$

Donde :

ΔL : Es la diferencia de color del parámetro L

L_m : Luminosidad tomada de la muestra

L_e : Luminosidad establecida

Cálculo de: $\Delta a = a_m - a_e$

Donde:

Δa : Es la diferencia de color del parámetro a

a_m : Parámetro a tomado de la muestra

a_e : Parámetro a establecido.

Cálculo de : $\Delta b = b_m - b_e$

Donde:

Δb :Es la diferencia de color del parámetro b

b_m :Parámetro b tomado de la muestra

be : Parámetro *b* establecido.

Posteriormente se calculó el parámetro ΔE que nos sirve para graficar realmente la pérdida de color durante el proceso de secado.

$$\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^2$$

Donde:

ΔE : Es la diferencia total de color,

ΔL :Diferencia de color del parámetro L

Δa : Diferencia de color del parámetro a

Δb : Diferencia de color del parámetro b

Estructura interna del betabel

Para observar la estructura del betabel se tomaron 3 muestras de cada temperatura analizada (60, 65, 70, 75 y 80 C), las cuales fueron observadas en el microscopio de luz con una amplificación de 4X.

RESULTADOS Y DISCUSION

6. I Cinética de secado del betabel

El proceso de secado es un proceso que depende de la temperatura de la mezcla de aire - vapor de agua y del material que se seca, esto forma parte de un proceso dinámico, el cual puede variar de acuerdo a las condiciones que se utilicen en el secado.

En la figura 10 se muestra la pérdida de peso del betabel en función del tiempo a las diferentes temperaturas utilizadas en el proceso, se puede observar que la velocidad de secado se ve influenciada por la temperatura del proceso, lo cual era de esperar, ya la velocidad de secado están en función de la temperatura del proceso; al inicio del proceso el betabel tenía una humedad del 85.6%, la cual se fue perdiendo con el tiempo y el valor final de humedad para cada temperatura utilizada (60, 65, 70, 75 y 80°C) fue de: 4.3%, 3.80%, 3.06%, 2.86% y 2.10%, respectivamente.

La velocidad de secado depende de la temperatura del proceso, el cual se ve influenciado principalmente por dos características; la estructura del betabel y la cantidad de agua disponible en el mismo y se relacionan entre ellas, ya que la estructura del betabel afecta la disponibilidad del agua para migrar desde el interior hasta la superficie donde se está llevando el secado. Esto afecta directamente la velocidad de transferencia de masa, lo cual nos indica que la velocidad de transferencia de masa se ve afectada por la temperatura de secado, por lo tanto un aumento en la temperatura de secado es proporcional a la velocidad con la que se elimina el agua presente en el betabel.

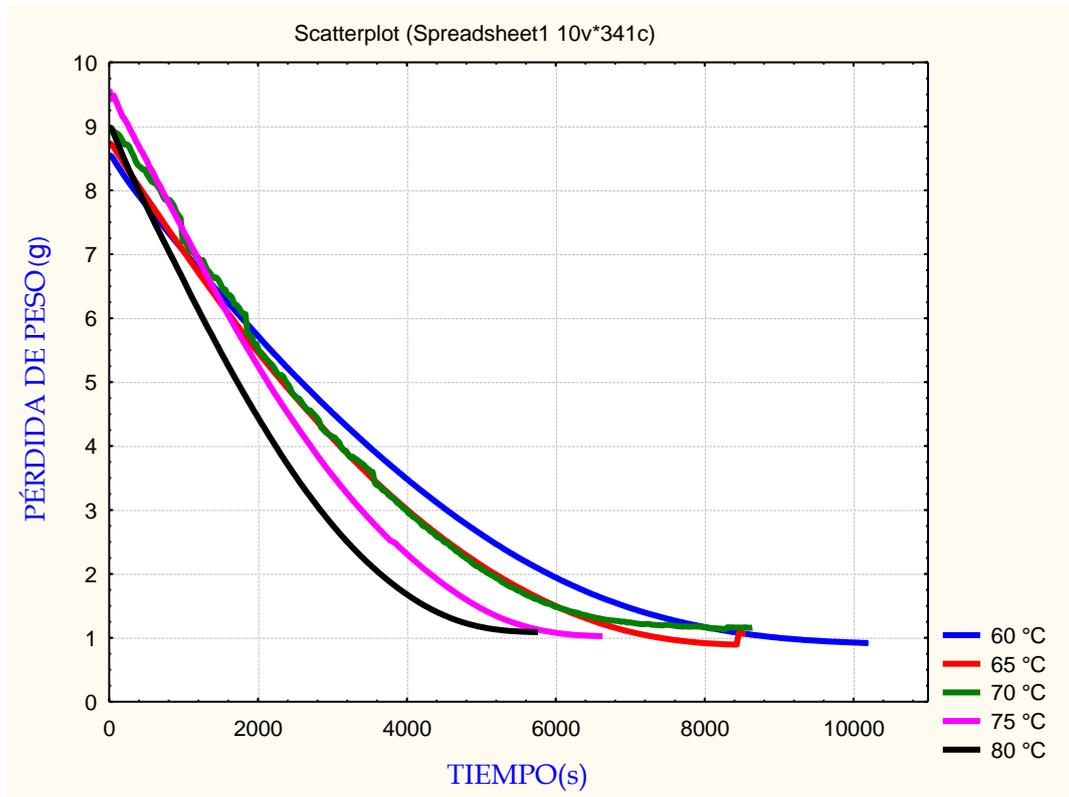


Figura 10: Pérdida de peso (g) del betabel en función del tiempo de secado.

Tomando en cuenta que el agua presente en el alimento se distribuye de la siguiente manera, agua libre, la cual presenta un comportamiento como agua pura y es la mas fácil de eliminar, ya que requiere poca energía para evaporarse y se encuentra en las primeras zonas identificadas (Figura 11), agua semi-ligada, la cual necesita mayor cantidad de energía para su eliminación en comparación con el agua libre, se encuentra localizada en las siguientes zonas, las cuales fueron identificadas de acuerdo a la pendiente y por ultimo se identifica el agua ligada, la cual por formar parte de la monocapa molecular y esto hace mas difícil su eliminación (Casp et Abril, 1998)., y se identifica en las dos ultimas zonas de la cinética de secado.

De lo anterior se puede decir que el agua que se elimina con mayor facilidad en el proceso, es la que se encuentra en la zona I, esto es principalmente a que existe una fina película de agua sobre el producto a secar y no existe resistencia interna ni externa a la transferencia de materia, la cual aumenta durante el proceso y este se vuelve más lento debido a que el agua tiene que pasar del interior del sólido a la superficie por mecanismos de difusión, mecanismos propios para alimentos que presentan características porosas como el betabel (Shafiur, 2006).

6.2 .Contenido adimensional de humedad (E) en el betabel

En la figura 12 se presenta el contenido adimensional de humedad presente en el betabel, el cual nos permite comparar los resultados obtenidos en las curvas de secado sin importar el peso inicial de cada muestra sometida al proceso de secado en función de la temperatura y el tiempo. En esta figura se puede observar de una manera más definida el cambio en la pendiente de las curvas, ya que se estandarizaron los datos, así se observa como en cada curva los cambios en la pendiente debido a la temperatura del proceso.

El contenido de humedad adimensional se define como la relación que existe entre el contenido de humedad que tiene la muestra después de que terminó el secado y el contenido que presenta en cualquier punto dado de la curva de secado.

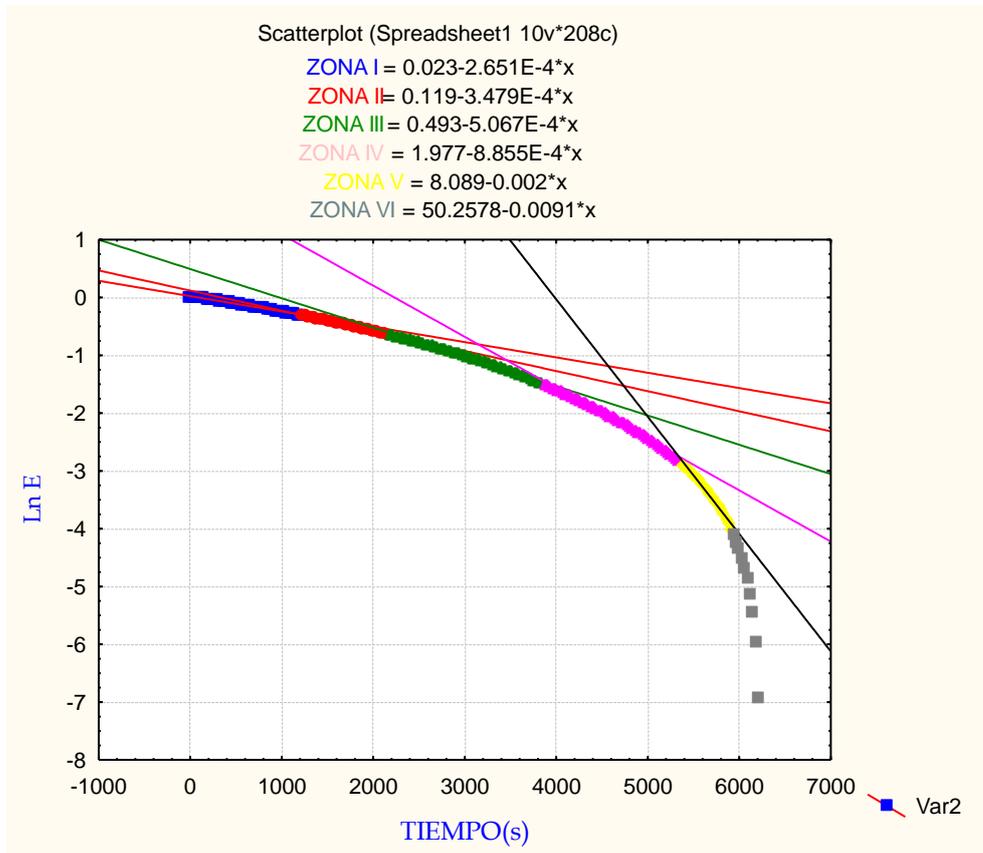


Figura 11: Distribución del agua en función del Ln E.

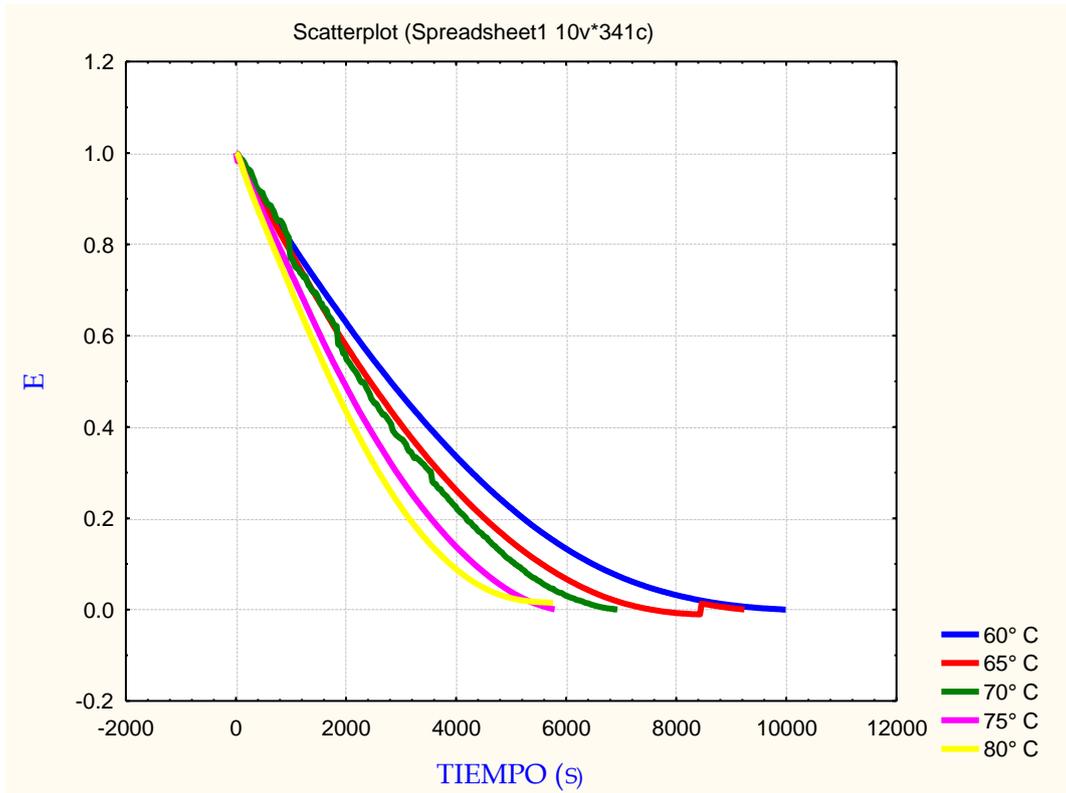


Figura12: Contenido adimensional de humedad (E) del betabel calculado en función de la temperatura de secado.



En las figuras 13 y 14 se muestran las curvas correspondientes a las temperaturas de secado de 60 y 80 °C, en estas figuras se aprecian más los cambios en las pendientes de cada curva, esto es debido a que en los datos obtenidos es más fácil su interpretación debido a que los datos fueron estandarizados

Se puede observar en las graficas que se distinguen 6 zonas lineales de diferentes pendientes, las cuales nos indican los periodos de secado: periodo de velocidad constante, primer periodo de velocidad decreciente y segundo periodo de velocidad decreciente. En la parte inicial de la grafica se observa el periodo de velocidad constante, este periodo se caracteriza por una reducción significativa del contenido de humedad, la evaporación se efectúa en la superficie del producto a temperatura constante, este periodo continua hasta que la superficie del producto deje de estar alimentada por agua libre líquida desde el interior (Caps et Abril, 1999); este finalizó en todos los tratamientos cuando el contenido medio de humedad del producto alcanzó el valor de la humedad crítica, en este momento la superficie del producto deja de ser alimentada y comienzan los periodos de velocidad decreciente, estos periodos comienzan cuando la superficie del producto en contacto con el aire de secado alcanza el umbral de higroscopicidad, la superficie de secado se desplaza de la superficie al interior del producto dando origen al primer periodo de velocidad decreciente.

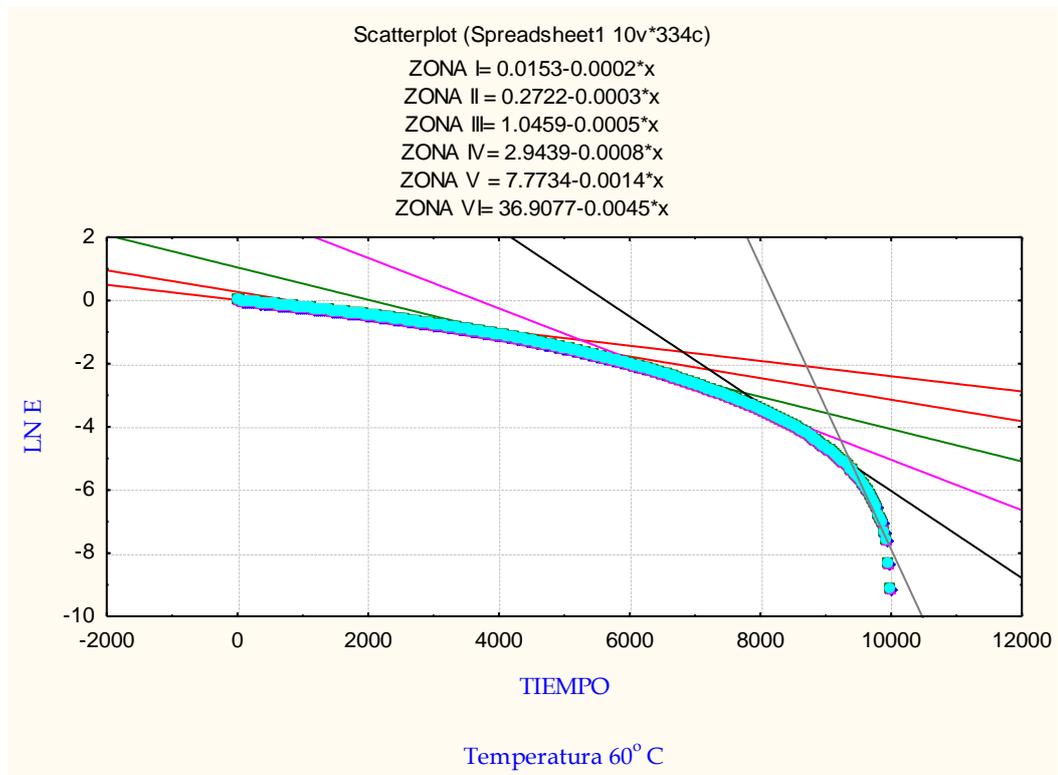


Figura 13: Curva de Ln E en función del tiempo 60°C.

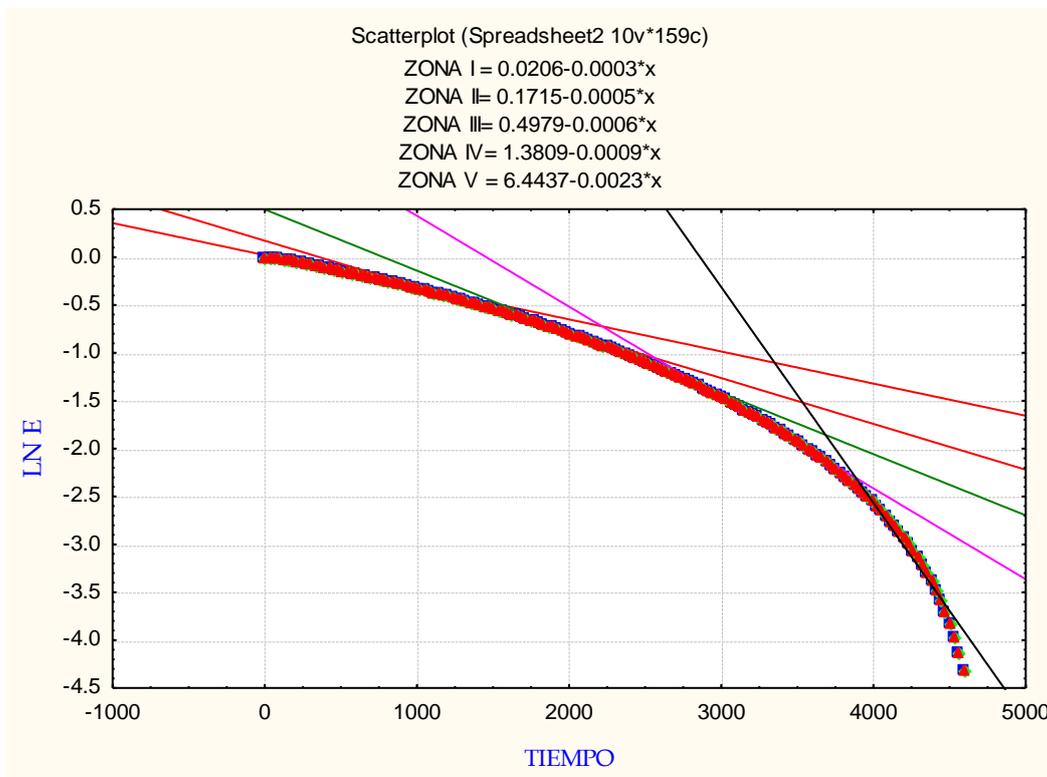


Figura 14: Curva de Ln E en función del tiempo 80°C.

En este periodo la migración de agua se hace mas difícil y como consecuencia, la transferencia de masa se convierte en el factor limitante, los depósitos de sólidos obstruyen los poros del betabel, el agua migra en forma de vapor y la distancia a recorrer por el frente de vapor es mayor cada vez, esto frena la transferencia interna de masa de una manera muy rápida, predominando en este periodo el transporte de masa por difusión de vapor desde la zona de evaporación hasta la superficie del producto(Desrosier,1999), provocando así una disminución en la velocidad de secado del producto, el cual depende de manera directa del contenido de humedad presente en el mismo.

En el segundo de periodo de velocidad decreciente, el flujo de secado es más lento, debido a la resistencia a la transferencia interna del material (betabel), originado principalmente por la estructura interna, la complicada red de poros y canales de interconexión entre cada componente interno del betabel, en este momento solo queda agua ligada(Doymaz, 2005), que se evapora lentamente provocando puntos dispersos en la grafica debido a la dificultad de esta para migrar desde el interior hacia la superficie, originando también una caída súbita en la grafica, debido a que la velocidad de secado se hace más lenta, este periodo termina cuando el producto alcanza su humedad en equilibrio.

6.3 Velocidad de secado

Al inicio del proceso la velocidad de secado fue alta, esto se debió principalmente al contenido inicial de humedad, el cual fue alto, así como a la estructura del betabel, este factor permanece elevado hasta que se alcanza una humedad baja, es decir, cuando se llega a un periodo de humedad critica, el cual depende de la temperatura y el tiempo de secado.

En el período de precalentamiento, el producto esta frío, su presión de vapor es igualmente baja, por lo tanto la velocidad de transferencia es muy lenta, en este momento, el agua contenida en el betabel se acondiciona a la temperatura utilizada en cada experimento, el cual termina cuando se alcanza el equilibrio

estacionario, momento que se origina cuando el excedente de calor es utilizado para calentar la superficie del producto, produciéndose una disminución en el gradiente de temperatura, llegando así al primer periodo de velocidad decreciente.

Como ya se mencionó anteriormente la disminución de la humedad finaliza hasta que se llega a la humedad en equilibrio, la eliminación de agua continua produciéndose solo con la diferencia de que no ocurre en toda la superficie, ya que aparecen zonas secas, de manera que la velocidad disminuye conforme disminuye la superficie mojada, lo cual se ve reflejado al aumentar la temperatura del aire de secado, originando un aumento en la velocidad de secado, por lo tanto la velocidad de secado y el contenido de agua libre son los factores de los que depende la cinética de secado de betabel, marcando la diferencia durante el proceso de secado, los cuales van disminuyendo debido a la dificultad para eliminar el agua ligada de la estructura del betabel, requiriéndose más energía para eliminar la misma cantidad de agua que al inicio del proceso de secado.

6.4. Difusividad efectiva de agua de betabel (*Beta vulgaris*)

Los valores obtenidos de los coeficientes de difusión efectiva del agua, calculados para las diferentes zonas, en función de la temperatura y expresados en cm^2/s , durante el secado, se presentan en la Tabla 3, se observa que el valor numérico del coeficiente de difusión efectiva del agua aumentó a medida que se eliminaba el contenido de agua en el betabel, en una determinada temperatura, de igual manera se observa que el coeficiente empieza a aumentar a partir de los $65\text{ }^\circ\text{C}$, donde las diferencias son estadísticamente significativas, este tipo de comportamiento se debe a que existe una mayor movilidad de las moléculas de agua al incrementarse la temperatura (Fuentes,2005). Como es conocido, la difusividad no depende de las condiciones externas, pero puede notarse una ligera variación en el valor de la difusividad efectiva del agua con el incremento de la velocidad del aire de

secado, el modelo disfuncional propuesto ajusta de una manera adecuada, en todos los casos, los datos experimentales, con bajos valores de desviación obtenidos.

Tabla 3: Coeficiente de difusión de agua (cm^2/s) a partir de los datos de la cinética de secado del betabel empleando la segunda ley de fick.

Valores de (Defw) a diferentes temperaturas					
ZONAS	60	65	70	75	80
ZONA I	1.01929E-06	1.15628E-06	1.22E-06	1.6187E-06	1.57E-06
ZONA II	1.62033E-06	1.66775E-06	1.63E-06	2.4799E-06	2.38E-06
ZONA III	1.62114E-05	2.43171E-05	1.62E-05	3.3829E-06	3.2E-06
ZONA IV	2.37699E-06	2.46292E-06	2.5E-06	4.0528E-06	4.05E-06
ZONA V	3.34644E-06	3.72943E-06	4.05E-06	1.2159E-05	4.46E-05
ZONA VI	4.05285E-06	0.055922822	8.11E-06	3.526E-05	

Mediante el análisis de varianza (ANOVA) realizado a la difusividad efectiva del agua en cada uno de los periodos de secado, utilizando el software Statistic (Statsoft 2000), con un nivel de confianza del 95%, se observó que hay una influencia estadísticamente significativa de la temperatura sobre el coeficiente de difusión efectiva.

En la tabla 4 , se muestran dichos análisis de varianza y en las figuras 15, 16 y 17, se muestran las comparaciones de los valores medios de los coeficientes de difusión efectiva, calculados para cada zona encontrada en la cinética de secado, de acuerdo a los valores obtenidos en el análisis de varianza, se puede decir que la temperatura de secado afecta los coeficientes de difusividad efectiva del agua en el betabel, observándose como era de esperar, que el

valor de los coeficientes de difusión efectiva aumentará conforme aumenta la temperatura del proceso.

Tabla 4: Resultados del ANOVA de los valores de difusión efectiva (D_{efw}) del betabel correspondiente a todas las zonas.

Zonas de la curva	Efecto	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P
	Intercepto	0	1	0	101.3504	0.000020
Zona I	Zona I	0	6	0	28.5684	0.000139
	Error	0	7	0		
	Intercepto	0	1	0	16.53656	0.006602
Zona II	Zona II	0	5	0	4.26167	0.053181
	Error	0	6	0		
	Intercepto	0	1	0	7.728318	0.049819
Zona III	Zona III	0	4	0	0.754093	0.604454
	Error	0	4	0		
	Intercepto	0	1	0	10.63123	0.022432
Zona IV	Zona IV	0	4	0	1.39950	0.0354774
	Error	0	5	0		
	Intercepto	0	1	0	6.072202	0.056935
Zona V	Zona V	0	4	0	1.203069	0.412613
	Error	0	5	0		
	Intercepto	0	1	0	4.802	0.038230
Zona VI	Zona VI	0	2	0	1.069	0.300127
	Error	0	3	0		

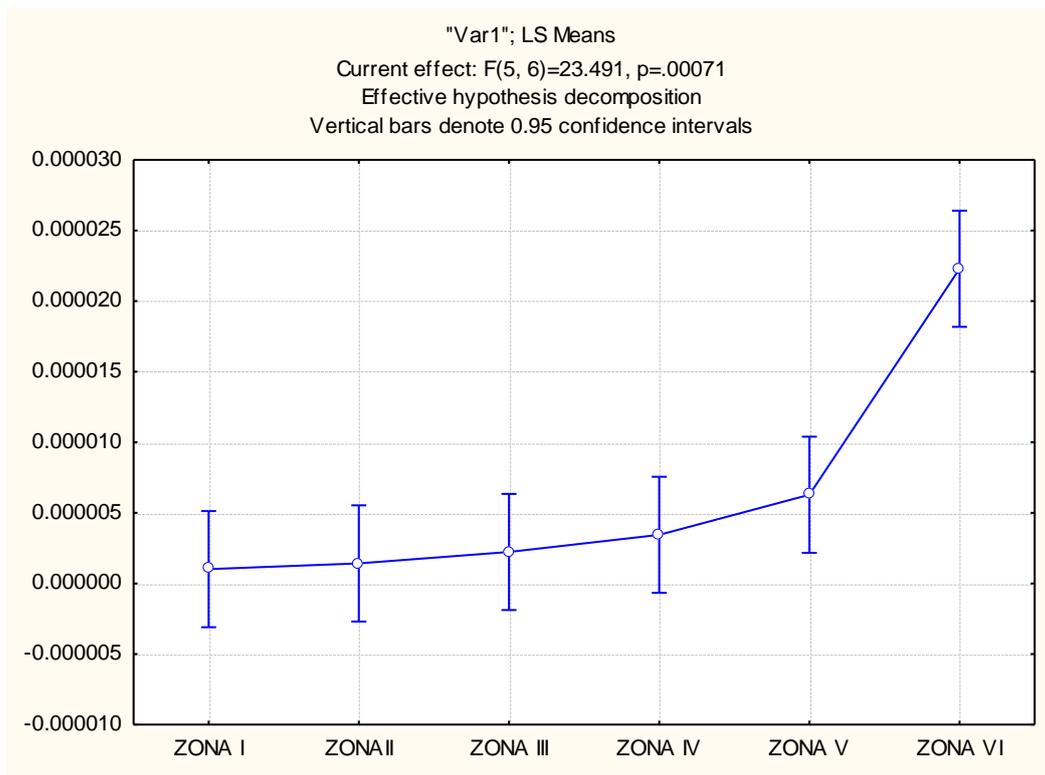


Figura 15: Comparación de los valores medios de los coeficientes de difusión efectiva del betabel correspondiente a las diferentes zonas a temperatura de 60 °C y los intervalos de confianza donde se observa la diferencia estadística encontrada entre estos valores a un nivel de significancia del 95%.

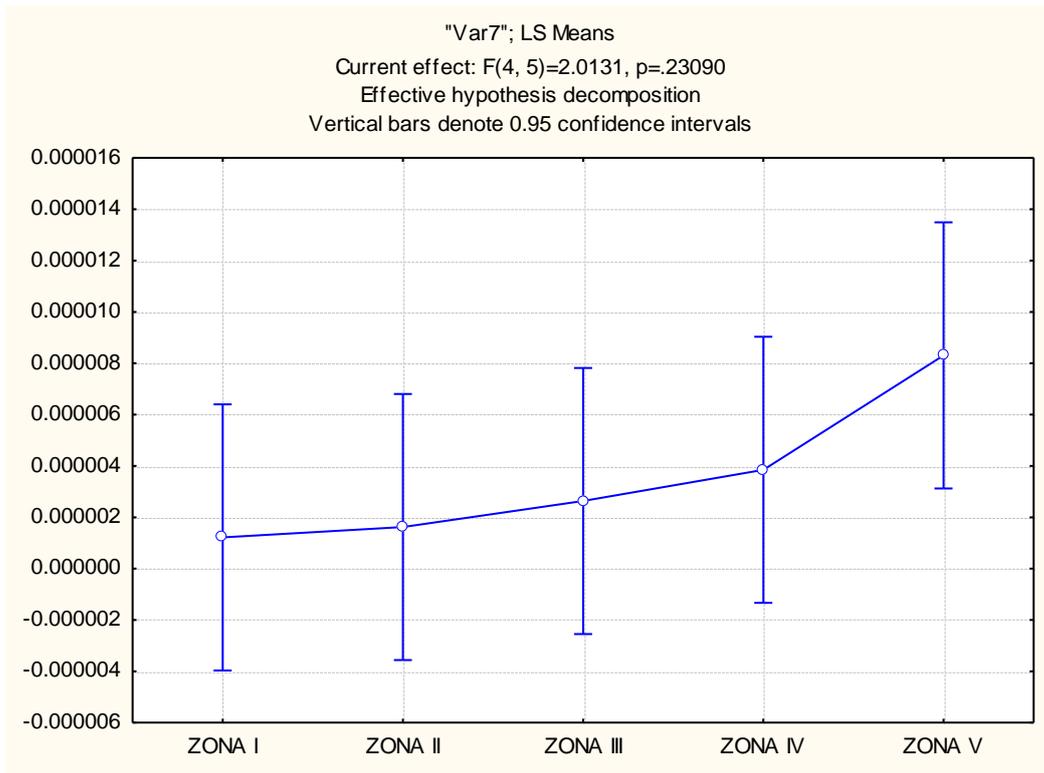


Figura 16: Comparación de los valores medios de los coeficientes de difusión efectiva del betabel correspondiente a las diferentes zonas a temperatura de 75 °C y los intervalos de confianza donde se observa la diferencia estadística encontrada entre estos valores a un nivel de significancia del 95%.

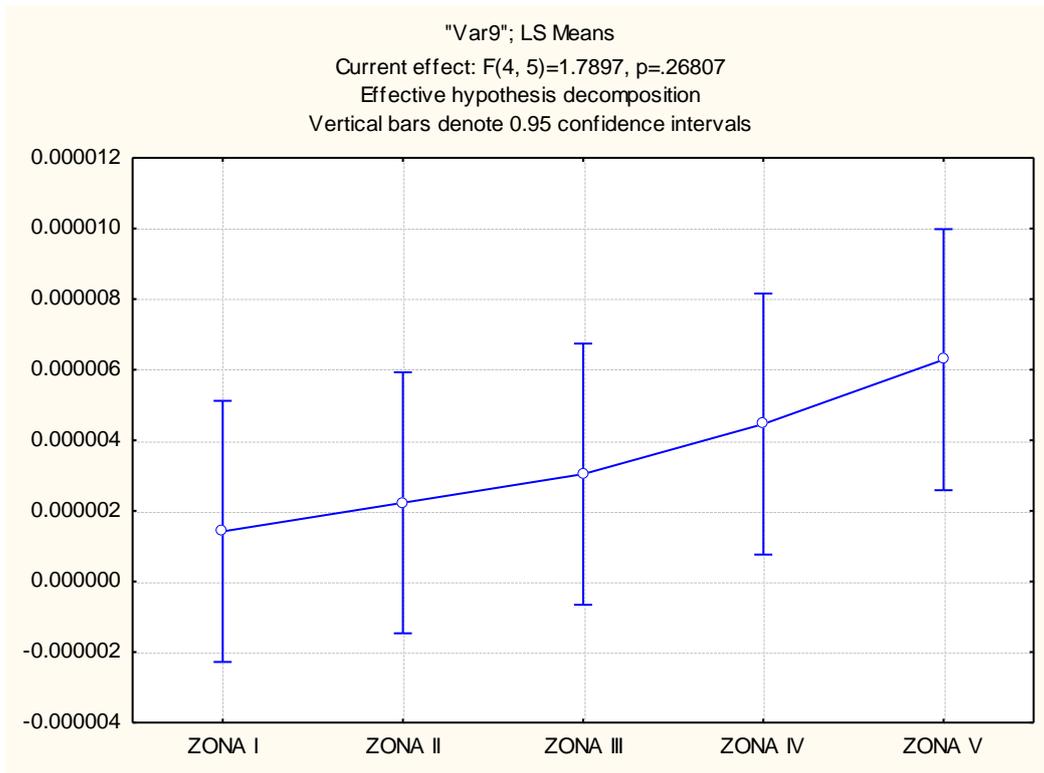


Figura 17: Comparación de los valores medios de los coeficientes de difusión efectiva del betabel correspondiente a las diferentes zonas a temperatura de 80°C y los intervalos de confianza donde se observa la diferencia estadística encontrada entre estos valores a un nivel de significancia del 95%.

Los valores de los coeficientes de difusión efectiva han sido evaluados mediante la solución analítica de la ley de Fick, bajo determinadas condiciones iniciales de contorno y de operación, empleando para la solución de tal ecuación una geometría de placa fina infinita.

La presencia de agua en un alimento dado es un punto crítico a tener en cuenta en la conservación del mismo y uno de los métodos principales para la eliminación del agua es el proceso de secado, donde la principal característica que controla dicho proceso es la velocidad de transferencia de masa del seno del alimento hacia el exterior del mismo, la cual es definida como la velocidad de difusión efectiva del agua, y esta puede variar de un alimento a otro, este tipo de variaciones se explican en base a la composición química y la estructura presente en cada uno de los alimentos, sin embargo estos datos pueden utilizarse para predecir el comportamiento de las curvas de secado o en la hidratación de los mismos, utilizando para esto, las ecuaciones anteriormente mencionadas sin olvidar las limitaciones de las mismas.

Uno de los factores que afecta de una manera notable a la difusividad es la estructura del betabel y la distribución inicial de la humedad en el producto, dado que la transferencia de calor y la difusión de materia son fenómenos similares, se podría decir que estos modelos pueden ser aplicables de forma indistinta para la determinación de los coeficientes de difusividad efectiva del agua (Alvarado, 2000).

6.5 Color en el Betabel

Durante el proceso de secado se originan varios cambios en el producto, los más importantes desde el punto de vista del consumidor son el color y la estructura final, alguno de estos cambios se originan principalmente por las reacciones de no enzimático (Reacción de Maillard) y por la degradación de los pigmentos propios del betabel (betalainas).

En la figura 18 se muestran los cambios de coloración que se originaron en el proceso de secado a las diferentes temperaturas utilizadas (60, 65, 70, 75 y 80 °C), respectivamente. La pérdida de color durante el proceso térmico es mayor a una temperatura de secado de 80 °C; en cambio dicho efecto es menor a una temperatura de 60 °C.

Los reportes sobre la pérdida de color en betabel por efecto de la temperatura de secado son limitados, sin embargo en un estudio realizado por Santander, 2009 se encontró que a temperaturas de 80 c y 60 c se observó una mayor y menor degradación del color de sus muestras respectivamente.

La pérdida de color en el betabel se originó principalmente por la reacción entre los carbohidratos y proteínas, los cuales son las biomoléculas que se encuentran en mayor proporción de acuerdo a la composición química del betabel; esto origina un oscurecimiento no enzimático también conocida como Reacción de Maillard.

Otro factor que interviene en el oscurecimiento es la disponibilidad de agua y la actividad de agua presente en el betabel, al inicio del proceso no es tan notable este oscurecimiento, debido a que el agua es un producto con diversas etapas de condensación durante las reacciones de oscurecimiento, por lo tanto al ir disminuyendo la actividad de agua y la disponibilidad de esta; el oscurecimiento irá en aumento esto se representa en las Figuras 19, 20 y 21.

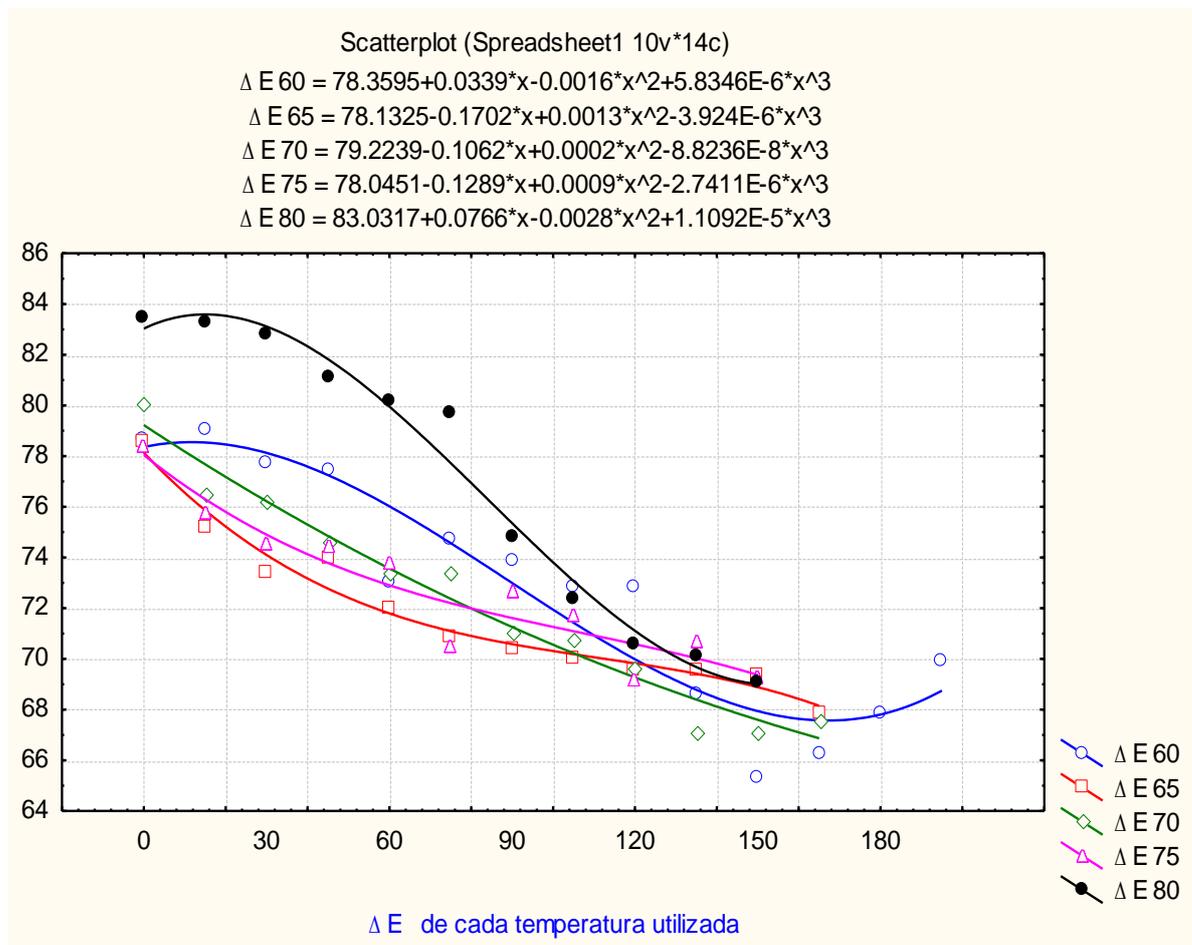


Figura 18: Representación de ΔE para las diferentes temperaturas utilizadas

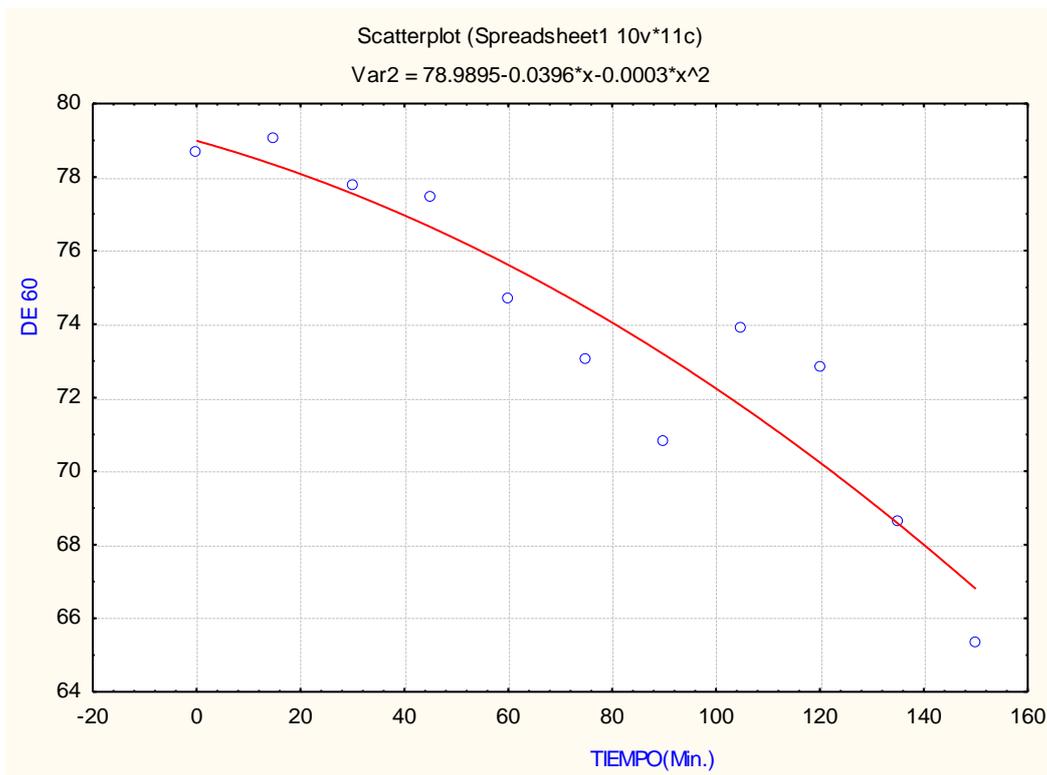


Figura 19: Efecto de la temperatura 60° C sobre el color del betabel

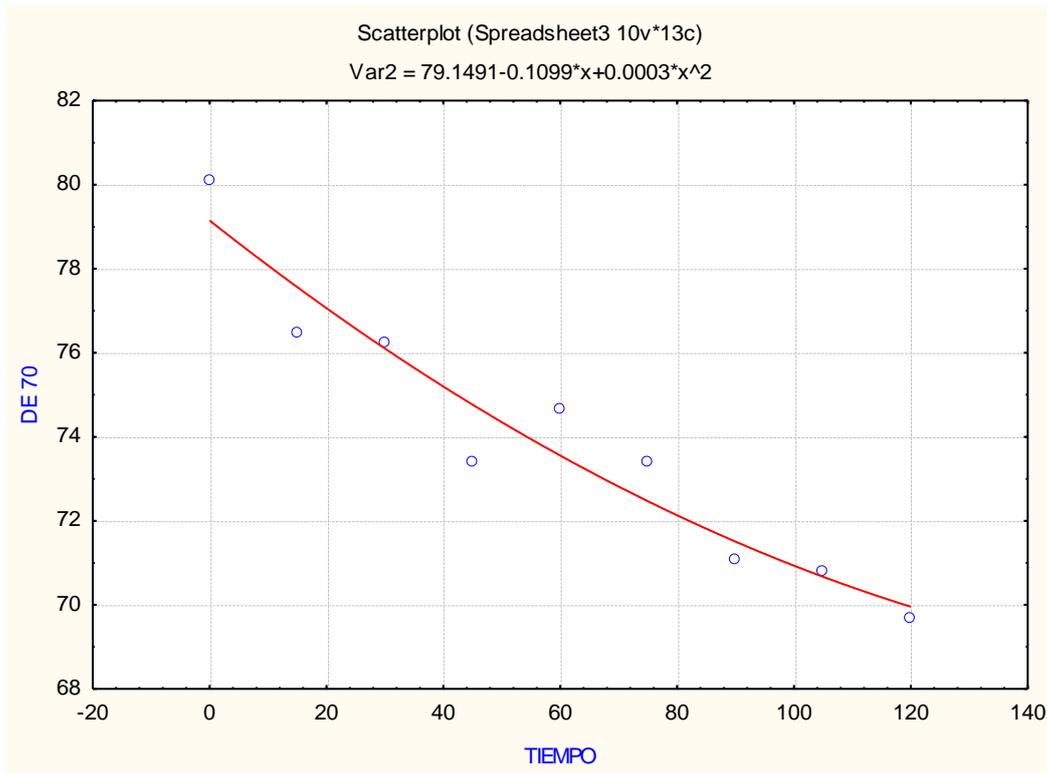


Figura 20: Efecto de la temperatura 75°C sobre el color del betabel

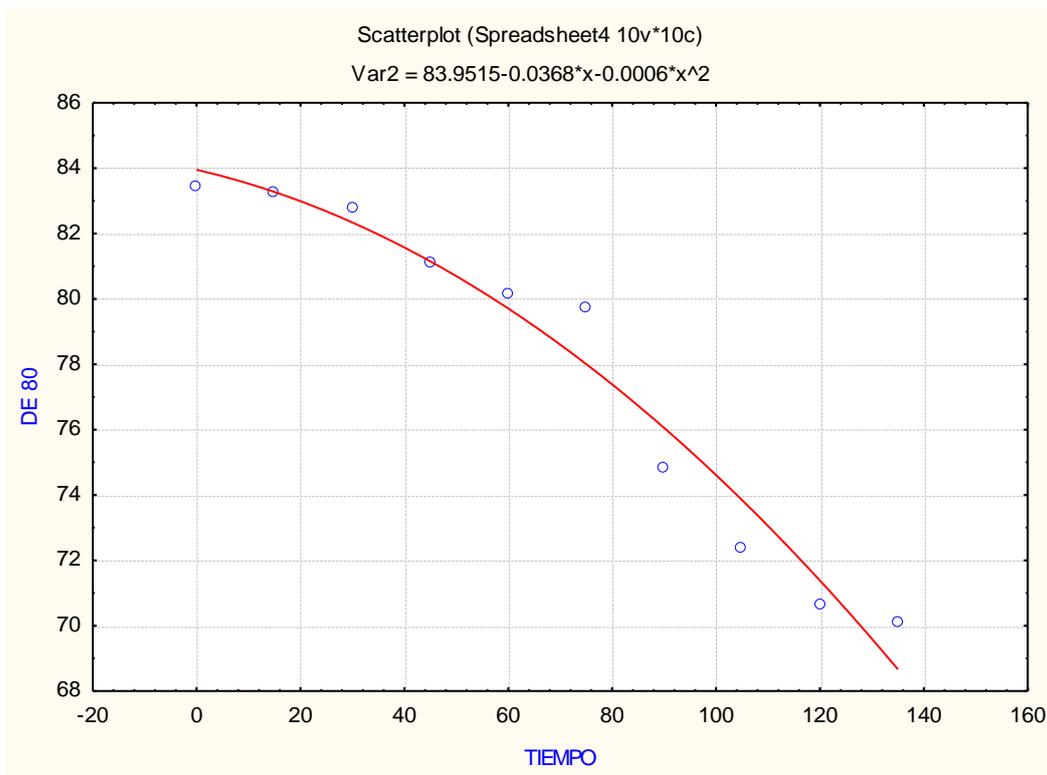


Figura 21: Efecto de la temperatura 80° C sobre el color del betabel.

Estos factores influyen de manera importante en la disminución del color original del betabel pero uno de los factores que mas influencia tiene sobre la pérdida de color es la degradación de los pigmentos propios del betabel, las betalaínas los cuales son alcaloides derivados de la tirosina los de importancia en este estudio son las betacianinas que proporcionan el color rojo-violáceo al betabel estos son glucósidos ,azúcares que se pierden en el proceso o reaccionan para dar origen a la pérdida de color.

En la estructura de las betalaínas se encuentra un amina primaria o secundaria unida con el acido betalámico los cuales al ser afectados por la temperatura aceleran el proceso de hidrólisis, dando origen al ácido betalámico incoloro y también a subproductos que proporcionan el color marrón. Esto provoca una pérdida considerable en el color del betabel durante el proceso de secado.

La pérdida de color en el betabel se ve influenciada por la temperatura de secado que se utiliza en el proceso siendo la temperatura que más le afecta a este factor la de 80 °C, debido principalmente a que con esta temperatura las reacciones de obscurecimiento se llevan a cabo con más facilidad, así como la disminución de la actividad de agua y la disponibilidad de la misma va en conjunto con este factor, la degradación de las betalaínas, pigmentos propios del betabel se ven alterados por efecto de la temperatura, debido a que aceleran la hidrólisis de la estructura (Hawkes, 1978).

6.6 Estructura interna del betabel

El tejido celular vegetal en estado vivo, presenta una turgencia típica, las paredes celulares están bajo tensión y el contenido celular bajo compresión, la pared celular posee una resistencia y elasticidad que la hace capaz de admitir determinados esfuerzos(Desrosier, 1999), pero al aplicar calor, este tipo de modificaciones cambia debido a la deformación que se produce, esto se muestra en las micrografías del betabel, donde se muestra la estructura inicial

del mismo y después del proceso de secado, bajo los diferentes tratamientos que se le aplicaron.

El efecto de la temperatura sobre la estructura interna del betabel no se muestra con demasiadas alteraciones (Figuras 23 a 27), debido a que las condiciones bajo las cuales se realizó el secado son realmente suaves, esto se logró tomando en cuenta los parámetros de humedad, ya que de este parámetro se define el tiempo y la velocidad de secado.

En cuanto a la estructura final, es sabido que se origina una deformación de la estructura, esto, como ya se menciona en la sección de antecedentes es provocado por la evaporación del agua desde la superficie húmeda, al entrar en contacto con el aire caliente, la concentración de solutos aumenta, el agua presente en las capas más profundas, se mueve hacia la superficie a través de las paredes celulares como consecuencia del gradiente de concentraciones, esto provoca una pérdida de fluido celular, originando la contracción del volumen de la célula, este tipo de modificaciones es de esperarse durante un buen proceso de secado, si las condiciones de secado no fueron las indicadas, se obtiene mayor ruptura de la estructura o se obtiene un secado deficiente, donde solo se obtiene una resistencia mecánica y el interior de la pieza todavía permanece húmedo (Bander,1965).

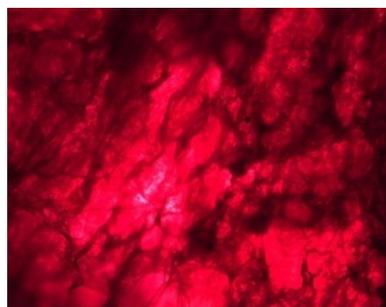


Figura 22: Micrografía betabel antes del tratamiento de secado

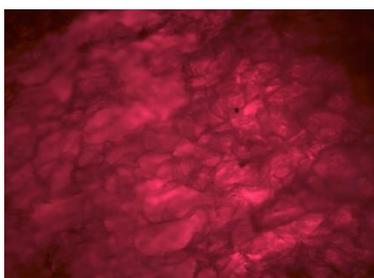


Figura 23: Micrografía betabel a 60 °C.



Figura 24: Micrografía betabel a 65 °C.

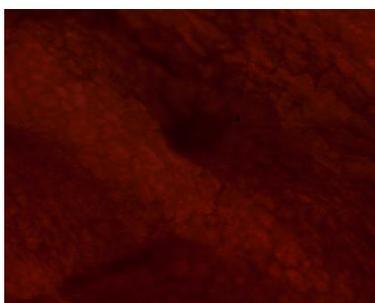


Figura 25: Micrografía betabel a 70 °C.

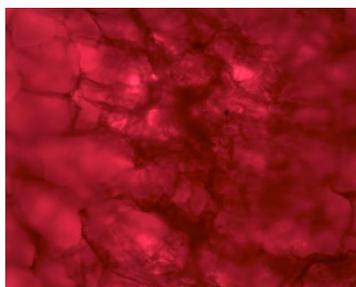


Figura 26: Micrografía de betabel a 75 °C.

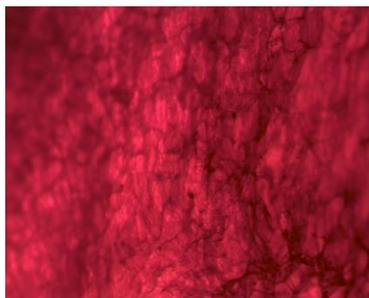


Figura 27: Micrografía de betabel a 80 °C.

CONCLUSIONES

Las cinéticas de secado del betabel fueron obtenidas en función de la temperatura, las cuales son descritas por la solución integrada de la segunda ley de Fick.

Los valores de los coeficientes de difusión efectiva del agua en el betabel se incrementaron a medida que el contenido de agua iba disminuyendo, es decir desde el inicio del periodo de velocidad constante hasta el final del segundo periodo de velocidad decreciente.

Se llevo a cabo la determinación de la degradación del color en el betabel durante el proceso de secado, la temperatura que más afecta la degradación de los pigmentos es la de 80 ° C y la de menor efecto es la de 60 ° C, los factores que intervienen en la pérdida de color son las reacciones de obscurecimiento no enzimático y la degradación de las betalaínas.

La estructura interna del betabel no se ve afectada de una manera considerable debido a que las condiciones de secado no fueron tan drásticas.

BIBLIOGRAFÍA

- **Allegra, M., Furtmiller, P.G., Jantschko, W.** 2005. Mechanism of interaction of betanin and indicaxanthin with human myeloperoxidase and hypochlorous acid. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 332, 837–844.
- **Álvarez, J.MM, Vitoria A. M. y Douglas R. B C.** 2003 Degradación de Betalainas en Remolacha (*beta vulgaris L.*) estudio Cinético. Universidad Simón Rodríguez, Carrera de Ingeniería de Alimentos, Laboratorio de Biomoléculas, Núcleo Canoabo, Sector Los Naranjos, Carretera Nacional vía Urama, Edo. Carabobo, Venezuela.
- **Alzamora, S.M., López-Malo, A. y Tapia D. M.S.** 2000. Overview. In *Minimally processed fruits and vegetables-fundamental aspects and applications*. (pp. 1-9). Gaithersburg, MD, USA, Eds. Alzamora, S.M. Tapia, M.S & López-Malo, A. Aspen Publishers, Inc.
- **Alzamora, S.M., Tapia. D., M.S. y Welti-Chanes, J.** 1998. New strategies for minimal processing of foods: the role of multi-target preservation. *Food science and technology international*.
- **Arana, R.** 1969. *Tecnología de los Alimentos* 3^{ra} Edición. Editorial Academic Press.
- **Badger, B.** 1965. *Introducción a la Ingeniería Química*. McGraw-Hill Ediciones Castilla. España.
- **Badui, D. S.** 1999. *Química de alimentos* 3^{ra} Edición. Editorial Longman.
- **Barbosa-Canovas, G.V y Vega- Mercado, H.** 2000. *Deshidratación de Alimentos* 1^{ra} Edición. Editorial Acribia, España.
- **Casp, A.V y Abril, J.R.** 1999. *Procesos de conservación de Alimentos*. Edición Mundi-Prensa, Madrid España.
- **Chang, R.** 2002. *Química. General*. 7^{ma} Edición. Editorial McGraw-Hill Interamericana S.A de C.V.

- **Davies, R., Birch, G.G. y Parker, K.J.** 1975. *Intermediate Moisture Foods*. London, UK. Applied Science Publishers Ltd.
- **Desroier, N. W.** 1999. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. 3^{ra} Edición. Editorial Compañía Continental, S. A de C. V. México. D. F.
- **Doymaz.** 2005. "Drying characteristics and kinetics of okra". *Journal of Food Engineering*. Vol. 69Nº 3, pp. 275-279.
- **FAO.** 1995a. *Fruit and vegetable processing*. Agricultural Services Bulletin 119, Rome.
- **FAO.** 1995b. *Small scale post-harvest handling practices - A manual for horticulture crops* 3^{ra} Edition, Series No. 8, Rome.
- **Fellows, P.** 1995. *Tecnología del Procesado de Alimentos* Editorial Acribia Zaragoza España.
- **Fennema, R. O.** 2000. *Química de Alimentos*. Editorial Acribia, Zaragoza, España.
- **Franco, M., A. L.; Mariezcurrena, B., D.;** Pérez, H., A.; Mendoza, C., Z. L.; Valdés, G., Y.; Velásquez, G., G.; Barcenás, O., N. 1998. *Delicias culinarias de la floricultura*. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Autónoma del Estado de México. México. Pag. 7.
- **Geankoplis, C.J.** 1982. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Editorial CRC Press. Florida.
- **Gould, G.W.** 1995. Overview. In *New methods of food preservation* (pp. XV-XIX). London, UK. Ed. Gould, G.W., Blackie Academic and Professional.
- **Guerrero, S., Alzamora, S.M. y Gerschenson, L.N.** 1994. Development of a shelf-stable banana purée by combined factors: microbial stability. *Journal of food protection* 57: 902-907.
- **Ibarz, A., Barbosa. G. V.** 1998. *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. Editorial. Mundi-Prensa., Madrid. España.
- **Krokida, M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., Marinos, D.** Kournis 2003. Drying Kinetics of some vegetables, *J.Food Eng.* pp. 391-403.

- **Lewiki, P.P.** 2003. Water as the Determinant of Food Engineering Properties. A review. Journal of Food Engineering. In Press.
- **Lobo, O., R.** 1997. Principios de transferencia de masa. Editorial UAM-I. México.
- **Madariaga, A.J.F.** 1995. El secado de biomasa residual de la caña de azúcar. Tesis para C. Dr.C.T.ISJAE. Fac. Ing. Mecánica. Ciudad de la Habana Cuba.
- **Maldonado, F.E.** 2005. Optimización del teñido de telas. Tesis para obtener el grado de Dr. En Ciencias Básicas. Universidad Nacional de Quilmas, Argentina.
- **Mari, M.J.** 2002. Cinética de transferencia de materia durante el proceso de rehidratación de cubos de pimiento seco (*Capsicum Annum L.*). Trabajo final de carrera, Escuela superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- **Navarrete, N.M., Fito, P.M., Chiralt, A. y Grau, A.M.** 1999. Termodinámica y Cinética de Sistemas Alimento Entorno. Universidad Politécnica de Valencia. Editorial. IPN, México.
- **Norman, N.P, Hotchkiss, J.H.** 1999. Ciencia de los Alimentos. 5^{ta}. Edición. Editorial. Acribia Zaragoza, España.
- **Ocampo, A.** 2006. Modelo Cinético del Secado de la Pulpa de Mango. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 5 p. 119-128. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín Colombia.
- **Ortega O., M. L.; Rodríguez.** 1979. Estudio de carbohidratos en variedades mexicanas de frijol (*Phaseolus vulgaris* y *P. coccineus L.*). Agrociencia. 37:33-49.
- **Pascual Viollaz, Clara O. Robedo.** 2002. A drying model for a three-dimensional shrinking bodies. Journal of Food Engineering. Vol. 52, 149-153.
- **Pérez G., M.; Márquez S., F.; Peña L. A.** 1997. Mejoramiento Genético de Hortalizas. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 380 p.
- **Roos, Y. y Karel M.** 1991. Applying state diagrams to food processing and development. Food Technology 45(12):66-79.

-
- **Santos M.D.S, Velásquez, Y.G** y Gonzales, M.M.C. 2000. Producción de pigmentos por callos de *Mammillaria*. *Candida Sheidweiler* (Cactaceae). Volumen 39. Numero 006. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México 619-626.
 - **Shafiur, M.R.** 2006. Manual de Conservación de Alimentos. Editorial Acribia, Zaragoza, España.
 - **Stintzing, F.C., Herbach, K.M., Mosshammer, M.R.** 2008. Color, betalain pattern, and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 442–451.
 - **Torregiani, D.** 1992. Osmotic dehydration in fruit and vegetables processing. *Food research international* 26: 59-68.
 - **Van D.B., C.** 1981. Vapor sorption equilibria and other water-starch interactions a physico-chemical approach. Doctoral thesis. Wageningen, The Netherlands: Agricultural University.
 - **Vega A.; Andrés A.; Fito P.** 2001. Cinética de secado por aire caliente de dados de pimiento (*Capsicum annum L.*). *Inf. Tecnol.* V. 9, n.3. La Serena, Chile.
 - **Vega, A.; Andrés, A. y Fito, P.** 2005. Modelado de la cinética de secado del pimiento rojo (*Capsicum annum L. cv L amuyo*). *Inf. Tecnol.* V. 16, n.6. La Serena, Chile.
 - **Wiley, R.C.** 1994. *Minimally processed refrigerated fruits and vegetables*. New York, USA, Chapman & Hall.
 - **Xué, K.; Cháfer, M.; González M., C.; Fito, P.; Chiralt, A.** 2001. Secado por aire caliente de pera variedad Blanquilla. III Congreso Iberoamericano de Ingeniería en Alimentos. Tomo II, Cap. 2, 235-240.
 - **Yúfera, P.E.** 1998. Química de los Alimentos. Colección Tecnología Bioquímica y de los Alimentos. Madrid, España.