



*UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DEL ESTADO DE HIDALGO*

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

**“Efecto de humectantes sobre la cinética de secado y rolabilidad de tortillas elaboradas con harina de maíz nixtamalizado Maseca.”**

*T E S I S*

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**LICENCIADA EN QUÍMICA EN ALIMENTOS**

P R E S E N T A  
**BLANCA STELLA THELPALO CARBALLO**

DIRECTOR DE TESIS:  
**Dr. CARLOS A. GÓMEZ ALDAPA**  
CODIRECTOR DE TESIS:  
**Dr. JAVIER CASTRO ROSAS**

Pachuca de Soto, Hidalgo

Abril de 2007



**El presente trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de Alimentos I, dentro del Centro de Investigaciones Químicas (CIQ), perteneciente a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), bajo la dirección del Dr. Carlos Alberto Gómez Aldapa y la codirección del Dr. Javier Castro Rosas.**



**Parte de los resultados de este trabajo fueron presentados en el 1er. congreso Internacional y 2do. Congreso Nacional de Nixtamalización del maíz a la tortilla en Santiago de Querétaro, Qro., México, octubre de 2006. Con la modalidad de póster y exposición oral.**

**Este trabajo se presentó en el 2do Foro de Química en alimentos 2006. Realizado en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo dentro de las instalaciones del CEVIDE en la ciudad de Pachuca de Soto, Hgo. Con la modalidad de exposición oral.**



*“A veces nos cansamos, por que nuestra vida es un combate diario, en el cual no siempre resultamos victoriosos. Esos son los omentos en los que debemos recurrir a nuestra fuerza interior y recordar que un buen guerrero, no es el que siempre triunfa, sino el que se sobrepone a las derrotas para continuar con su lucha”*

Gracias Dios por que con tu infinita bondad, me haz regalado la oportunidad de conocer a lo largo de mi vida, personas con una calidad humana maravillosa, gente sencilla, humilde y sabia, que han procurado mi bienestar y progreso en todos los ambitos. A mi familia, a todos mis profesores, maestros y amigos, por que su amistad, sus palabras de aliento, su apoyo incondicional y su ejemplo. Solo quiero que sientan que el objetivo logrado tambien es suyo. Los llevo conmigo siempre, nunca los olvidare.

A mis tios, quienes siguiendo el ejemplo de mis abues, han sabido mantener un nucleo familiar, siempre con una atmosfera de amor, respeto y union inmensurable. Su forma de luchar fue mi ideal, su sacrificio mi aliento y su esfuerzo constante, la fuerza de mi voluntad. Gracias a toda mi familia por que me han enseñado que para lograr nuestros sueños hay que tener fe, ser incansables y persistentes, por que los sacrificios siempre tienen grandes recompensas, los amo!!!.

A mi manta Sandra, que siempre ha estado a mi lado impulsandome a seguir adelante, brindandome su amistad y cariño incondicional en todo momento y por que gracias a ti aprendi que la paciencia es un don que se ve recompensada por los resultados. Te quiero mucho amiga.

A mis comadres, Loree, Sari y Kris, personas unicas y geniales, por que siempre han estado a lado mio para echarme porras y para extenderme la mano cuando he caido, dandome los

mejores consejos y haciendo mi vida feliz, ¡¡¡comadres las quiero rete mucho, no lo olviden!!!, nuestra época universitaria solo fue el pretexto para conocernos y el preámbulo de una larga amistad.

Gracias Doc. Carlos, es un privilegio haber formado parte del grupo al cual le impartió clases por primera vez, y a pesar de sus nervios y nuestro miedo a la fisicoquímica creo que todo salió mejor de lo que esperábamos, o no???. Gracias por ser un gran amigo antes que asesor, sin su apoyo y su amistad seguramente no hubiera sido posible terminar esta tesis, que sin duda alguna puso a prueba nuestra paciencia y tolerancia con tantos imprevistos que se suscitaron a lo largo de la investigación, gracias por confiar en mi y por hacer que también yo confiara en mi. Por cierto... siempre leí mis copias!!!, lo que sucedía es que generalmente no entendía nada.

Gracias a todos mis sinodales los cuales también conocí como catedráticos y amigos durante mi estancia en la universidad, Dra. Elizabeth, Dra. Alma, Dra. Angélica, Dr. Javier, Mtra. Irais y todos los que conforman la plantilla de académicos de la carrera, gracias por su dedicación y esfuerzo (pero principalmente por su paciencia, saben a lo que me refiero, verdad????), cada uno de ustedes contribuyó a formar la persona que soy ahora, ávida de superación pero sobre todo, de conocimiento.

Gracias a todos mis amigos del museo, un lugar mágico en el que podemos ser nosotros mismos y que nos otorga el privilegio de conocer amigos verdaderos, convirtiéndonos en personas más humanas, sensibles y felices, a Tere, Fabi, Clau, Vero, Alondra, Rogelio, Selene, Anita... y todos los que me falta por mencionar, gracias por permitirme ser su amiga, los quiero mucho!!!!

Con amor, admiración y respeto.

Blanca Stella T. Carballo.

Dedicada a dos de las mujeres más extraordinarias del mundo,  
sabiendo que jamás existirá una forma de agradecer toda una  
vida de lucha, sacrificio y esfuerzo constante.  
Para ti abuelita donde quiera que estés y para ti jefa, las amo.

# Í N D I C E   G E N E R A L

	<i>Pág.</i>
Agradecimientos	<i>iv</i>
Dedicatoria	<i>vi</i>
Índice General	<i>vii</i>
Índice de cuadros	<i>x</i>
Índice de figuras	<i>xi</i>
Nomenclatura	<i>xiv</i>
<i>Capítulo I</i>	
<i>Resumen</i>	<i>1</i>
1.1. Abstract	<i>3</i>
<i>Capítulo II</i>	
<i>Introducción</i>	<i>4</i>
<i>Capítulo III</i>	
<i>Antecedentes</i>	<i>8</i>
3.1. El agua en los alimentos	<i>9</i>
3.1.1. Interacciones entre el agua y otros componentes de los alimentos	<i>10</i>
3.1.2. Actividad de agua	<i>14</i>
3.1.3. Clasificación del agua en los alimentos	<i>16</i>
3.2. Fenómenos de transferencia de masa en los alimentos	<i>17</i>
3.2.1 Mecanismos de transporte de agua	<i>19</i>
3.2.1.1. Transporte de vapor de agua	<i>19</i>
3.2.1.2. Transporte de agua líquida	<i>20</i>
3.2.2. Difusividad efectiva de agua	<i>20</i>

3.3.	Secado	24
3.3.1.	Cinética de secado	25
3.3.2.	Etapas de una cinética de secado	34
3.3.2.1.	Periodo de velocidad constante	35
3.3.2.2.	Periodo de velocidad decreciente	35
3.3.3	Psicometría	36
3.4.	Definición de harina de maíz nixtamalizado	38
3.4.1.	Propiedades funcionales de la masa de maíz nixtamalizado	38
3.5.	La tortilla	40
3.6.	Los humectantes	41

## *Capítulo IV*

### *Objetivos*

4.1.	Objetivo general	45
4.2.	Objetivos particulares	45

## *Capítulo V*

### *Metodología Experimental*

5.1.	Materiales e instrumentos de medición	47
5.2.	Actividades preliminares	48
5.3.	Obtención y registro de datos	50
5.3.1.	Tratamiento de datos de las cinéticas de secado	50
5.4.	Análisis de textura mediante el parámetro de rolabilidad	53

## *Capítulo VI*

### *Resultados y discusiones*

6.1.	Cinéticas de secado de las tortillas	57
6.2.	Coeficientes efectivos de difusión de agua	71
6.3.	Efecto de los humectantes en la rolabilidad	76



<i>Capítulo VII</i>	
<i>Conclusiones</i>	81
<i>Referencias bibliográficas</i>	83
<i>Anexos</i>	89
Anexo A. Puesta en marcha de la balanza	90
Anexo B. Ejemplo de secuencia de cálculos	92

## *Índice de cuadros*

	<i>Pág.</i>
<b>Cuadro 1.</b> Métodos para determinar difusividad.	22
<b>Cuadro 2.</b> Relaciones psicométricas de la mezcla aire-vapor de agua.	37
<b>Cuadro 3.</b> Relación agua-harina para la elaboración de tortillas.	48
<b>Cuadro 4.</b> Datos requeridos para los cálculos.	52
<b>Cuadro 5.</b> Valores de $D_{efw}$ , calculados a partir de las diferentes pendientes de cada curva de E y del espesor de la tortilla analizada (L).	74
<b>Cuadro 6.</b> Resultado del ANOVA realizado a los valores de $D_{efw}$	75
<b>Cuadro 7.</b> Valores asignados a cada tortilla dentro de la escala subjetiva de rolabilidad.	78
<b>Cuadro 1A</b> Resultado de la secuencia de cálculos para obtener las curvas de cinética de secado.	97
<b>Cuadro 2A</b> Datos de E para el cálculo de $D_{efw}$	100

## *Índice de figuras*

	<i>Pág.</i>
<b>Figura 1.</b> a) Modelo esquemático de una molécula HOH simple, b) Estructura de la molécula de agua.	11
<b>Figura 2.</b> Configuración tetraédrica de moléculas de agua unidas por enlaces de hidrógeno.	12
<b>Figura 3.</b> Hidratación de una macromolécula.	15
<b>Figura 4.</b> a) Curva de contenido de humedad contra tiempo b) Curva típica de materiales muy húmedos	26
<b>Figura 5.</b> Curva de velocidad de secado-tiempo.	28
<b>Figura 6.</b> Curva de velocidad de secado-humedad o curva de Krischer.	30
<b>Figura 7.</b> Curva de temperatura-tiempo.	31
<b>Figura 8.</b> Curva característica de velocidad de secado	33
<b>Figura 9.</b> Estructura química del manitol y glicerol	42
<b>Figura 10.</b> Curva del Ln de E en función del tiempo para el Cálculo de $D_{efw}$ .	54
<b>Figura 11.</b> Valores de las pendientes correspondientes a cada una de las rectas obtenidas de las curvas.	55
<b>Figura 12.</b> Gráfica de cinética de secado del control (peso de la tortilla en función del tiempo).	58
<b>Figura 13.</b> Gráfica de cinética de secado del control (división de la curva de acuerdo a sus pendientes).	59
<b>Figura 14.</b> Comparación entre las curvas de cinética de secado de las tortillas adicionadas con glicerol a las tres diferentes concentraciones y el control.	62
<b>Figura 15.</b> Gráfica de cinética de secado de la tortilla adicionada con glicerol al 0.5% (división de la curva de acuerdo a las pendientes).	63

<b>Figura 16.</b> Gráfica de cinética de secado de la tortilla adicionada con glicerol al 1.0% (división de la curva de acuerdo a las pendientes).	64
<b>Figura 17.</b> Gráfica de cinética de secado de la tortilla adicionada con glicerol al 1.5% (división de la curva de acuerdo a las pendientes).	65
<b>Figura 18.</b> Comparación entre las curvas de cinética de secado de las tortillas adicionadas con manitol a las tres diferentes concentraciones y el control.	67
<b>Figura 19.</b> Gráfica de cinética de secado de la tortilla adicionada con manitol al 0.5% (división de la curva de acuerdo a las pendientes).	69
<b>Figura 20.</b> Gráfica de cinética de secado de la tortilla adicionada con manitol al 1.0% (división de la curva de acuerdo a las pendientes).	70
<b>Figura 21.</b> Gráfica de cinética de secado de la tortilla adicionada con manitol al 1.5% (división de la curva de acuerdo a las pendientes).	72
<b>Figura 22.</b> Fotografías de las tortillas adicionadas con manitol y glicerol a las mínimas concentraciones y el control. a) Control, 90 min de reposo. b) Control, 120 min de reposo. c) Manitol 0.5%, 120 min de reposo. d) Glicerol 0.5%, 120 min de reposo.	79
<b>Figura 23.</b> Fotografías de las tortillas adicionadas con manitol y glicerol al 1.5% (comparaciones). a) Glicerol 1.5%, 120 min de reposo. b) Glicerol 1.5%, 150 min de reposo. c) Manitol 1.5%, 120 min de reposo. d) Manitol 1.5%, 150 min de reposo.	80
<b>Figura 1A.</b> Curvas de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre (ejemplo de uso de secuencia de cálculo).	96
<b>Figura 1B.</b> Curva de velocidad de secado (peso de tortilla En función del tiempo).	98

**Figura 2A.** Curva de contenido adimensional de humedad contra tiempo (ejemplo de uso de secuencia de cálculo).

101

## Nomenclatura

<i>Símbolo</i>	<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>
$A$	Área de secado	$\text{cm}^2$
$\mathcal{A}$	Sustancia que se difunde	
$a_w$	Actividad de agua	
$\mathcal{B}$	Sustancia en la que se difunde $\mathcal{A}$	
$C$	Concentración	$\text{kg mol} / \text{m}^2$
$C_S$	Calor húmedo de la mezcla aire-vapor de agua	$\text{KJ/Kg aire seco}$
$D$	Coefficiente de difusión	$\text{cm}^2 / \text{s}$
$D_{efw}$	Coefficiente de difusión efectivo	$\text{cm}^2 / \text{s}$
$D_K$	Difusividad de Knudsen	$\text{cm}^2 / \text{s}$
$D_L$	Difusividad de líquido	$\text{cm}^2 / \text{s}$
$D_n$	Difusividad de Stefan	$\text{cm}^2 / \text{s}$
$E$	Cantidad adimensional de agua	
$F$	Valores de tablas y calculado para ANOVA	
$G$	Glicerol (humectante)	
$H$	Cantidad de humedad	$\text{Kg agua/Kg a.s.}$
$H_O$	Hipótesis nula	
$H_A$	Hipótesis alternativa	
$H_p$	Porcentaje de humedad	%
$H_R$	Humedad relativa	%
$J$	Densidad de flujo	$\text{g/cm}^2 \text{ s}$
$m$	Pendientes de las curvas de E	
$M$	Manitol (humectante)	
$L$	Espesor de la placa	$\text{cm}$
$P$	Presión total	$\text{Pa}$
$p$	Presión de vapor de agua en un alimento	$\text{Pa}$
$P_A$	Presión del aire	$\text{Pa}$
$P_O$	Presión de vapor del agua pura	$\text{Pa}$

$R$	Velocidad de secado	g agua/cm <sup>2</sup> s
$R_V$	Velocidad constante de secado a $t = 0$	g agua/cm <sup>2</sup> s
$R_W$	Velocidad de secado a $t > 0$	g agua/cm <sup>2</sup> s
$r$	Radio de la placa circular	cm
$T$	Temperatura total	°C
$t$	Tiempo	s
$W$	Masa del sólido húmedo a $t \geq 0$	g sólido húmedo
$W_0$	Masa de sólido húmedo a $t = 0$	g sólido húmedo
$W_s$	Masa de sólido seco	g sólido húmedo
$X$	Contenido de humedad libre	g agua/g s.s.
$\bar{X}$	Contenido de humedad libre media	g agua/g s.s.
$X_0$	Contenido de agua inicial	g agua/g s.s.
$X_e$	Contenido de agua de equilibrio	g agua/g s.s.
$X_t$	Contenido de humedad en base seca	g agua/g s.s.
$\Delta$	Incremento	
$\alpha$	Nivel de significancia	
$\mu$	Representación de las medias en las hipótesis	
$\mu_{WA}$	Potencial químico del vapor de agua en el aire	KJ/Kg
$\mu_{wa}$	Potencial químico del agua en el alimento	
$X$	Fracción de agua en el sólido	
$Z$	Zona dentro de la curva	



# Resumen





## *Capítulo I*

### *RESUMEN*

El endurecimiento o envejecimiento de las tortillas es un proceso químico natural debido al cual, grandes cantidades de tortillas se pierden y son desechadas, sin embargo, es posible retrasar este fenómeno con la adición de sustancias químicas como los humectantes. En el presente trabajo se evaluó el efecto de dos humectantes sobre la cinética de secado, los coeficientes de difusión efectiva y la roabilidad de tortillas elaboradas con harina de maíz nixtamalizado comercial (HMN). Los humectantes empleados fueron glicerol y manitol adicionados a tres diferentes concentraciones 0.5%, 1.0% y 1.5 % en relación al peso de HMN empleada para cada formulación de las tortillas. Ambos humectantes favorecieron la retención de agua aun en la mínima concentración empleada (0.5%), sin embargo, la formulación de manitol al 1.5%, retrasa la deshidratación y mantiene la textura de la tortilla por 120 minutos, mostrando un daño mínimo a los 150 minutos de tiempo después de elaborada. La velocidad de secado observada en todos los experimentos, fue constante durante casi todo el proceso, las interacciones que se generaron entre el hidrogeno de cada radical OH presente en la estructura química del humectante y el agua presente en el alimento, aunque de baja energía fueron suficientes para retrasar su evaporación y prolongar el tiempo de secado, sin embargo, al tener el doble de la cantidad de iones OH el manitol en su estructura molecular en comparación con el glicerol, éste ofrece mejores resultados. La adición de humectantes en las diferentes concentraciones solo modifica la composición química de la masa pero no altera la estructura tridimensional a nivel macromolecular de la misma, por lo tanto no existe diferencia significativa en el coeficiente efectivo de difusión del agua.



## **1.1 Abstract**

The hardening or aging of the tortillas is a natural chemical process due to the one which, big quantities of tortillas get lost and they are discarded, however, it is possible to retard this phenomenon with the addition of chemical substances as the humectants. In this work the effect of two humectants was evaluated on the drying kinetics, the coefficients of effective diffusion and the rollability of tortillas elaborated with commercial nixtamalized corn flour. The humectants used were glycerol and manytol. Added at three different concentrations (0.5%, 1.0% and 1.5%) in relation to the weight of HMN. Both humectants even favored the retention of water in the minimum concentration used (0.5%), however, the manytol formulation to 1.5%, retards the dehydration and maintains the texture of tortilla for 120 minutes, showing a minimum damage at 150 minutes after elaborated. The drying speed observed in all experiments, was constant during almost the whole process, the interactions that were generated among the hydrogen of each radical OH presents in the chemical structure of the humectants and the water present in the food, although of low energy they were enough to retard its evaporation and to prolong the time of drying, however, the amount of OH presents in the molecular structure of manytol is twice in comparison with the glycerol. Manytol offers better results. The humectants addition in different concentrations modifies the chemical composition of the mass but it doesn't alter the three-dimensional structure at macromolecular level of the same one, therefore significant difference doesn't exist in the effective coefficient of diffusion of the water.



# Introducción



## Capítulo II

### INTRODUCCIÓN

La tortilla de maíz es el alimento más consumido en México, y su consumo se ha incrementado en Norteamérica y en parte de América Central. En zonas rurales de México, la tortilla provee aproximadamente el 50% de las proteínas, el 70% de las calorías y el 49% del calcio consumido por la población (Serna-Saldívar, 1990; Flores-Farías, 2000). En México, la tortilla forma parte de la dieta de todos los estratos sociales, el consumo anual aproximado de 12 millones de toneladas (INEGI, 2000).

Las tortillas elaboradas con harinas comerciales no son comparables en calidad con las producidas con el método tradicional de nixtamalización (tales como el sabor, olor, textura, entre otras). Sin embargo, la harina de maíz nixtamalizado, ha ido desplazando poco a poco la producción de masa fresca en la elaboración de tortillas por muchas razones; la principal es que se obtienen tortillas con menor calidad, pero con la ventaja de emplear un menor tiempo y esfuerzo para producir tortillas y además esta materia prima tiene mayor rendimiento (15% aproximadamente) con respecto al nixtamal y con menores costos de producción (Palacios-Fonseca, 2004).

Una de las operaciones unitarias que con frecuencia se utiliza en la industria de los alimentos es la del secado, que es la separación de un líquido contenido en un sólido; en algunos casos la separación se logra utilizando una mezcla de aire-vapor de agua (Geankoplis, 1982; Ocon y Tojo, 1972; Treybal, 1995), esta operación involucra los fenómenos de transferencia de masa y de calor; para estudiarla existen diversos procedimientos, que por lo general comienzan por pruebas a nivel laboratorio y piloto, para posteriormente, si fuera el objetivo que se persigue, llegar a una escala industrial (Boudhrioua y col., 2003; Geankoplis, 1982; Kemp y col., 2001). En el caso de los estudios a nivel laboratorio son diversos los



diseños experimentales útiles para la obtención de datos de cinéticas de secado de un material alimenticio. A partir de los datos de cinética de secado es posible el cálculo de coeficientes de difusión de agua en sistemas sólidos y semisólidos; Saravacos (1995) y Saravacos y Maroulis (2001), ofrecen una clasificación general de los métodos empleados para el cálculo de los coeficientes de difusión, en el que incluyen la cinética de secado. Ejemplos de algunos de los diseños experimentales utilizados para obtener datos de cinéticas de secado son los reportados por Toğrul y col. (2003); Yamamoto y col. (2002); Sabarez y col. (1999) y Boudhrioua y col. (2003). La existencia de tal diversidad de aparatos experimentales, en conjunto con las distintas soluciones propuestas a la ley de difusión de masa en flujo unidireccional para tratar los datos obtenidos y la variabilidad en la composición de los materiales alimenticios estudiados, originan que no haya un método estándar para la determinación de coeficientes de difusión (Boudhrioua, 2003).

Cuando los sistemas que se estudian son materiales homogéneos en los que el gradiente de concentración de un solo componente, es la fuerza que provoca el mecanismo de transferencia, el transporte de este material puede ser explicado por la ecuación de la difusión de masa, formulada por Fick (Gekas, 2000; Thomson, 2000), pero en el caso de materiales no homogéneos, como sucede con los alimentos, el proceso de transferencia de masa se da mediante varios mecanismos simultáneos, en los que diferentes potenciales (concentración, presión y temperatura), impulsan el movimiento del agua; siendo necesario utilizar el coeficiente efectivo de difusión, en lugar del coeficiente de difusión, ya que no es posible separar dichos mecanismos de transferencia de masa (Gekas, 2000; Kerkhoof, 2001; Muthukumarappan y Gunasekaran, 2001; Sabarez y Price, 1999). El coeficiente efectivo de difusión también toma en cuenta la dificultad de la trayectoria de difusión, porosidad, tamaño de poro y la fracción real del área disponible a la difusión (Lobo, 1997).



Hasta el momento el problema de la determinación del coeficiente efectivo de difusión de agua o difusividad efectiva ( $D_{efw}$ ), en los alimentos, calculados a través de datos de cinética de secado, ha sido directamente estudiado mediante la utilización de diferentes diseños experimentales basado en el uso de una balanza (Arámbula y col., 1999; 2000)

El endurecimiento o envejecimiento de las tortillas es un proceso químico natural y que provoca la pérdida de grandes cantidades de tortillas se pierden y son desechadas, este fenómeno es posible retrasarlo con la adición de sustancias químicas como los humectantes.



# Antecedentes



## Capítulo III

### ANTECEDENTES

#### 3.1. El agua en los alimentos

Los alimentos son materiales de origen biológico, cuando se encuentran en estado fresco, generalmente, el principal componente, en cuanto a proporción, es el agua. Los alimentos pueden ser susceptibles de someterse a un proceso de transformación con la finalidad principal alargar su vida de anaquel por periodos prolongados (Lewicki, 2003).

El agua tiene importancia crítica en las cualidades deseables de los mismos, es determinante en la velocidad de muchas reacciones químicas, tanto deseables como indeseables que se llevan a cabo en los alimentos (Fennema, 2000).

Todos los alimentos, aún los deshidratados, contienen cierta cantidad de agua (Badui, 1999). La cantidad de agua que se puede encontrar en los alimentos esta dentro de un intervalo que va del 1% hasta el 98%, tomando en cuenta la existencia de alimentos líquidos, semisólidos y sólidos (Lewicki, 2003). Los productos frescos y los alimentos líquidos contienen usualmente grandes cantidades de agua, mientras que los alimentos horneados o secos presentan bajos contenidos de agua (Lewicki, 2003).

La seguridad microbiológica, la estabilidad en el almacenamiento, las propiedades físicas y las operaciones de transformación a las que puede someterse un alimento, en general, pueden ser afectadas por la interacción que presenta el agua consigo misma y con los demás componentes del alimento (Fennema, 2000; Lewicki, 1997; 2003).



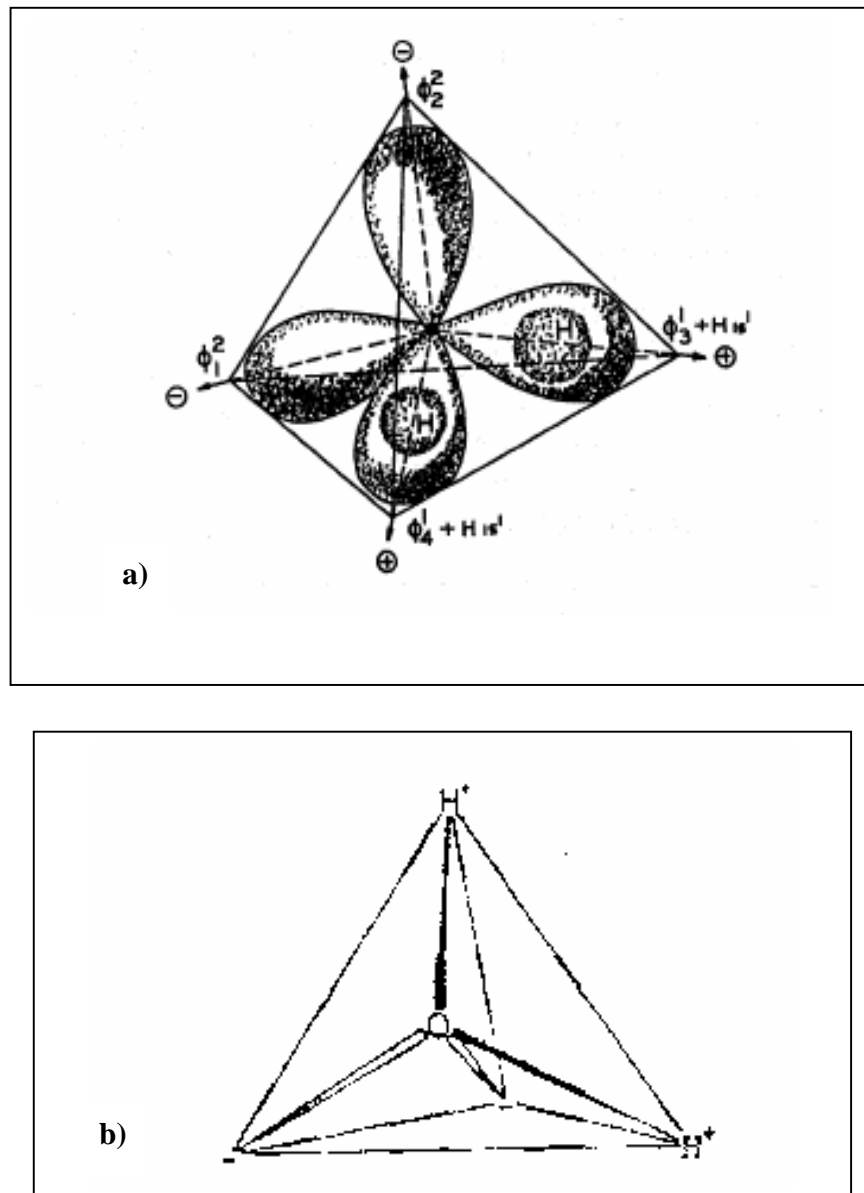


### 3.1.1 Interacciones entre el agua y otros componentes de los alimentos

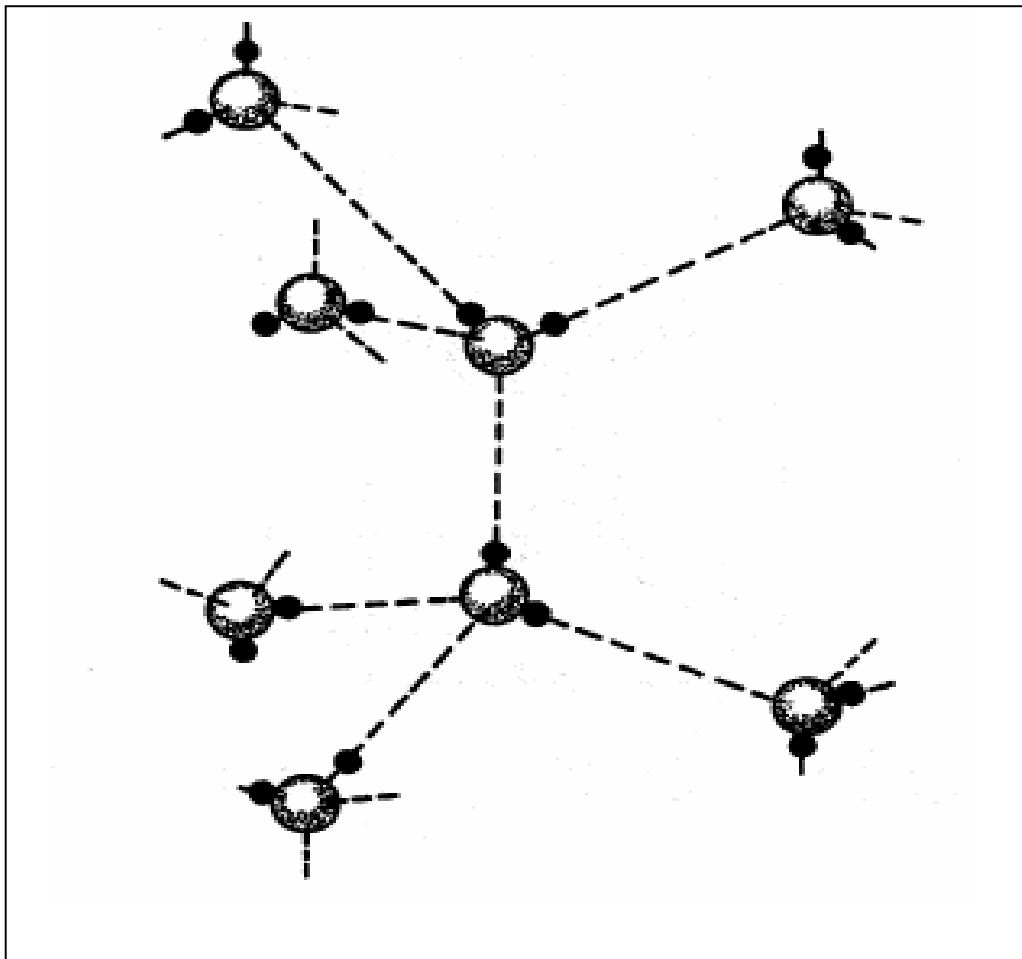
Además de contener agua, los alimentos están formados por materiales poliméricos (proteínas, carbohidratos y lípidos) y por componentes de bajo peso molecular (azúcares simples, sales y ácidos orgánicos) (Badui, 1999). La forma en que el agua interactúa consigo misma y con el resto de los componentes de los alimentos es el resultado de su estructura molecular (figura 1). La molécula de agua es representada con un tetraedro regular, el cual en el centro geométrico tienen un átomo de oxígeno, en dos de los vértices se encuentra un átomo de hidrógeno, que debido a la electronegatividad del átomo de oxígeno, presenta carga parcial positiva y en los dos vértices restantes se encuentran orbitales con pares de electrones apareados. Las cargas parciales y la estructura de la molécula de agua son responsables de las interacciones, de atracción o de repulsión, que se pueden dar entre las moléculas de agua con otras moléculas constituyentes de los alimentos, la principal forma de interacción es la formación de puentes de hidrógeno (Fennema, 2000; Lewicki, 2003).

La capacidad del agua para intervenir en la formación tridimensional de enlaces de hidrógeno, permite explicar lógicamente muchas de sus propiedades anormales; sus grandes valores de capacidad calórica, punto de fusión, punto de ebullición, tensión superficial y entalpías de las diversas transiciones de fase están relacionados con la energía extra necesaria para romper los enlaces de hidrógeno intermoleculares (figura 2) (Fennema, 2000).

Con las proteínas y los polisacáridos el agua establece interacciones hidrofílicas gracias a los grupos polares que tienen estas macromoléculas. El almidón, o sus unidades estructurales, la amilosa o la amilopectina, presentan grupos  $-OH$ , con los que el agua establece puentes de hidrógeno. Las proteínas presentan otros



**Figura 1.** a) Modelo esquemático de una molécula HOH simple (Fennema, 2000).  
b) Estructura de la molécula de agua (Lewicki, 2003)



**Figura 2.** Configuración tetraédrica de moléculas de agua unidas por enlaces de hidrógeno. Los círculos blancos representan átomos de oxígeno y los negros de hidrógeno. Los enlaces de hidrógeno están representados por líneas discontinuas (Fennema, 2000).



grupos funcionales polares como el  $-NH_2$ ,  $-SH$  y  $-COOH$ , con los que el agua también forma puentes de hidrógeno.

Como consecuencia de la interacción entre el agua y un polímero, sobre la cadena del polímero se forma una capa de hidratación en la que moléculas adyacentes de agua se encuentran parcialmente inmovilizadas y ordenadas. La creación de esta capa de agua asociada interviene en la disolución y dispersión de las moléculas. En compuestos tales como las proteínas o polisacáridos las interacciones intermoleculares cambian la nube electrónica y el exceso o diferencia en electrones que se produce en la molécula del polímero conduce a la formación de puentes de hidrógeno y las moléculas de agua se integran a la estructura del polímero (Lewicki, 2003).

Se pueden reconocer dos estados de agua de acuerdo a las interacciones que presente. Un estado en el cual las moléculas de agua están inmovilizadas en la estructura de una macromolécula, es a menudo llamada el agua estructural. El otro estado es, en el que el movimiento del agua no está totalmente restringido; en este estado la molécula de agua puede reorientarse con respecto a los enlaces iónicos de hidrógeno; este tipo de agua es también llamada agua de hidratación. El grado y tenacidad de la unión del agua o hidratación depende de diferentes factores entre los que se incluye la naturaleza del constituyente no acuoso, la composición salina, el pH y la temperatura (Fennema, 2000).

La capacidad de retención de agua es un término que se emplea frecuentemente para describir la eficacia de una matriz de moléculas, normalmente macromoléculas presentes a bajas concentraciones, para atrapar físicamente grandes cantidades de agua, inhibiendo la exudación. Entre las matrices alimentarias familiares que atrapan agua de este modo figuran los geles de pectina y el almidón, así como las células de los tejidos, tanto vegetales como



animales (Fennema, 2000). En la figura 3 se representa la manera en que una macromolécula interactúa con el agua.

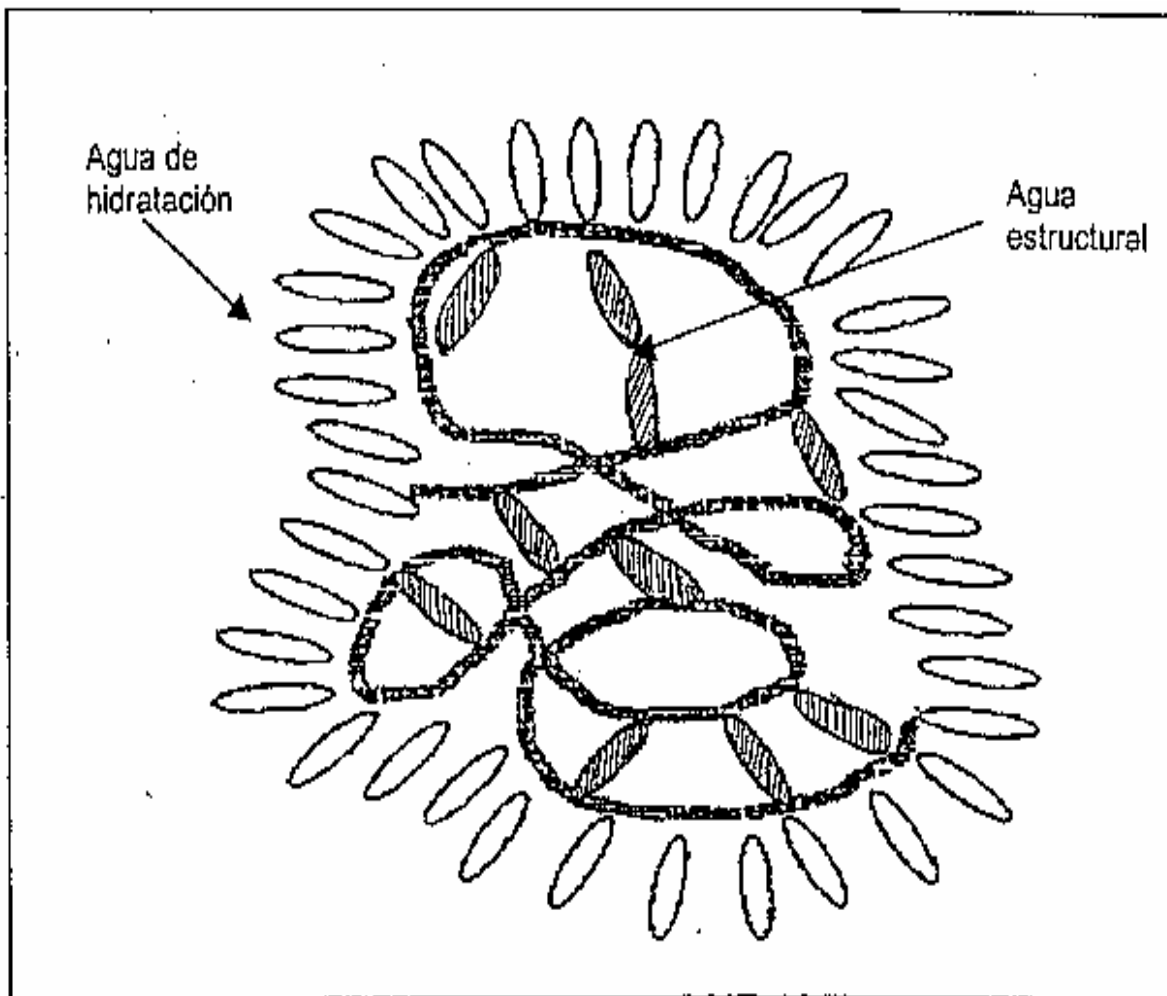
Los compuestos apolares, como los lípidos, y los compuestos polares que presentan grupos apolares, interactúan con el agua estabilizando las moléculas de agua en el espacio y provocando que el líquido tome una estructura similar a la de un sólido.

La disociación de algunos grupos lleva a una interacción iónica. Los solutos de bajo peso molecular, como las sales, pueden afectar la interacción que se da entre el agua y las macromoléculas, especialmente los solutos que se disocian.

Los solutos compiten por el agua, esto lleva a que cambie la conformación especial del polímero al liberar agua. Se da una redistribución del agua 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 presente propiedades de disolvente (Lewicki, 2003).

### **3.1.2. Actividad de agua**

La actividad de agua puede ser tomada como una estimación del estado y de la interacción del agua y el resto de los componentes de un sistema alimenticio (Lewicki, 1997; 2003). Desde el punto de vista termodinámico la actividad de agua o coeficiente de actividad, es una medida del potencial químico del agua en



**Figura 3.** Hidratación de una macromolécula (Adaptado de Lewicki, 2003)



el sistema (Rizvi, 1995). Si se considera un sistema, integrado por un alimento y el aire que le rodea, a condiciones constantes de temperatura y presión, en donde el agua se encuentra en estado líquido en el alimento y como vapor en el aire, se tiene la siguiente ecuación de equilibrio:

$$\mu_{WA} = \mu_{Wa} \quad (1)$$

En donde  $\mu_{WA}$  es el potencial químico del vapor de agua en el aire y  $\mu_{Wa}$  es el potencial químico del agua en el alimento. Una descripción termodinámica de la actividad de un sistema alimenticio, supone que este se encuentra en equilibrio con los alrededores (Gekas, 2000; Rizvi, 1995). La siguiente expresión matemática corresponde a la actividad de agua  $a_w$ :

$$a_w = \left[ \frac{p}{P_0} \right]_{P,T} \quad (2)$$

Donde  $p$  es la presión de vapor de agua en el alimento y  $p_0$  la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura y presión total.

### 3.1.3. Clasificación del agua en los alimentos

El agua en un alimento puede ser de constitución, es decir, aquella que es parte del alimento, o puede ser añadida durante el proceso de transformación. A nivel molecular, la interacción química o física con otros componentes determina la forma en que se presenta, puede ser como agua libre o como agua ligada, aunque no se ha establecido una clara división entre ambos términos (Badui, 1999; Fennema, 2000; Lewicki, 2003).



Desde el punto de vista de la cinética de secado el agua libre de una muestra es el contenido de agua por encima del valor del agua de equilibrio.

El agua de equilibrio, más comúnmente nombrado como humedad de equilibrio, se refiere a un estado de equilibrio entre un material y sus alrededores; se llega al contenido de humedad de equilibrio cuando el alimento se encuentra, a condiciones constantes de humedad relativa y temperatura, en contacto con el aire de los alrededores con el tiempo suficiente para que se alcance la condición de que la presión parcial del vapor de agua del alimento y del vapor de agua del aire sean iguales, en este estado el alimento no cederá agua al medio circundante, ni recibirá del mismo. La humedad libre se puede eliminar fácilmente por secado y está en función de las condiciones de humedad relativa y temperatura del aire que rodea el alimento (Geankoplis, 1982; Ocon y Tojo, 1972; Treybal, 1995). Algunos investigadores hacen referencia al término de agua *semiligada*, que definen como un estado intermedio entre el agua ligada y el agua libre, en este caso, las interacciones del agua con los demás componentes son débiles, pero suficientes para dificultar su eliminación por secado (Arámbula y col., 1999; 2000).

El agua ligada no es fácil de identificar como tal, aún así se puede hablar de agua ligada como la porción del agua en los alimentos sólidos que esta fuertemente enlazada a sitios individuales de otros componentes moleculares. Este tipo de agua desarrolla una presión inferior a la del agua pura líquida a la misma temperatura. El agua ligada no es fácil de congelar (-40 °C) o de eliminar por secado (Fennema, 2000; Geankoplis, 1982; Ocon y Tojo, 1972).

### 3.2. Fenómenos de transferencia de masa en los alimentos

La presencia de agua y las interacciones que presente con los demás componentes de los alimentos puede producir cambios físicos, químicos y





biológicos, que son determinantes para la adecuada conservación de los alimentos. Es por lo anterior que en el procesamiento de los materiales alimenticios el agua es la principal sustancia que es transferida. En algunas operaciones como el secado, la remoción con disolventes, el salado y el empaçado, es necesario conocer la migración de los componentes de los materiales para el control del proceso y de la calidad final del alimento (Gekas, 2000; Karel, 1975).

Las dos formas principales en que se puede presentar el transporte de masa son: la convección y la difusión. El primer mecanismo es un transporte debido al movimiento global de un fluido, es decir, a nivel macroscópico, mientras que el segundo se da entre los grupos agregados de moléculas y no depende del movimiento macroscópico del fluido, sino de la propiedades de los componentes que se difunden (Lobo, 1997; Gekas, 2000). En los alimentos el principal mecanismo de transferencia de agua o humedad, es el de difusión, fenómeno explicado por las leyes de Fick (Saravacos, 1995; Treybal, 1995). La primera ley de Fick se expresa matemáticamente como:

$$J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dx} \quad (3)$$

Donde el subíndice A representa a la sustancia que se difunde y el subíndice B representa la sustancia en la que se difunde A y  $J_A$  es la densidad del flujo molecular de A,  $D_{AB}$  es el coeficiente de difusión de A en el material B,  $C_A$  es la concentración de A y X es la distancia, en dirección x.

La ecuación 3 es solo válida para sistemas de coordenadas fijas, en los cuales un componente se difunde en flujo unidireccional, en una fase inmóvil donde no hay cambios de volumen. La segunda ley de Fick se presentará en la sección 3.2.2.



### 3.2.1. Mecanismos de transporte de agua

El agua que es transportada en el interior de los alimentos, sean sólidos o semisólidos, puede presentarse como vapor o líquido, por lo tanto los mecanismos de movimiento del agua pueden ser catalogados como mecanismos de transporte de vapor de agua y como mecanismos de transporte de agua en estado líquido. El mecanismo de transporte de agua que se presente, estará en función de la estructura del material sólido y de las condiciones del medio circundante, principalmente de la temperatura y la presión. De acuerdo a la clasificación que presenta Muthukumarappan y Gunasekaran (2001), dentro de los primeros mecanismos se considera a la difusión de Knudsen ( $D_k$ ), la difusión de Stefan ( $D_n$ ), la difusión mutua y al fenómeno de evaporación-condensación. En los mecanismos de transporte de agua en estado líquido se consideran el flujo capilar, la difusión de líquido ( $D_L$ ), el flujo de Poiseuille y la difusión desde la superficie.

#### 3.2.1.1. Transporte de vapor de agua

La difusión de Knudsen ( $D_k$ ), uno de los mecanismos de transporte de agua en forma de vapor, se presenta cuando los sólidos están llenos de gas y la longitud de los poros es menor que su diámetro, provocando que el choque de las moléculas de vapor de agua con las paredes del poro sea más frecuente que el choque entre moléculas de agua. En este caso, el mecanismo es explicado en términos del vapor, del tamaño y número de los poros, de la geometría de la matriz sólida y de la difusividad de Knudsen, la difusión mutua, se presenta cuando los canales por los que se mueve el vapor de agua son menores al diámetro de los poros (Geankoplis, 1982; Muthukumarappan y Gunasekaran, 2001).



En la difusión de Stefan, la difusividad ( $D_n$ ) es una constante y el flujo por área de agua es una función de la presión de vapor, de la presión total y de la difusividad de Stefan de vapor dentro del material.

En ocasiones el vapor de agua dentro del sólido se condensa cercano a la superficie. La velocidad de condensación es igual a la velocidad de evaporación en la superficie del sólido, por lo que no existe acumulación de agua en los poros próximos a la superficie. Esta teoría toma en cuenta la difusión simultánea de calor y de masa, suponiendo que los poros son una red continua de espacios en el sólido (Muthukumarappan y Gunasekaran, 2001).

### **3.2.1.2. Transporte de agua líquida**

En el flujo de agua líquida a través de capilares, el agua se mantiene en los intersticios de los sólidos, el líquido sobre la superficie o el agua libre en las cavidades celulares se mueve por acción de la tensión superficial, a través conductos en los que el flujo es continuo (Muthukumarappan y Gunasekaran, 2001; Treybal, 1995). La difusión del líquido puede deberse a gradientes de concentración en el interior del sólido; el movimiento de líquidos por difusión en sólidos se da en sistemas en los cuales el agua y el sólido son mutuamente solubles. La difusión en la superficie es observada durante la absorción de una sustancia por el sólido. Bajo ciertas condiciones como alta temperatura, esto puede elevar el flujo total del componente que se difunde (Geankoplis, 1982; Muthukumarappan y Gunasekaran, 2001).

### **3.2.2. Difusividad efectiva de agua**

Un material alimenticio, generalmente es un material no homogéneo. La estructura física de un alimento y las condiciones externas de secado determinan los



diferentes mecanismos de transporte de agua que se puedan presentar, estos mecanismos actúan en combinación. Es por lo anterior que el coeficiente de difusión del agua en alimentos es usualmente definido como la difusividad efectiva de agua ( $D_{efw}$ ), la cual es una propiedad global de transporte que incorpora todos los mecanismos de transporte (Gekas, 2000; Karel, 1975; Lobo, 1997; Muthukumarappan y Gunasekaran, 2001). Para la determinación de los coeficientes de difusión o de difusión efectiva de un material existen diversos métodos; debido a tal diversidad de métodos, los datos publicados de difusividad de agua en productos alimenticios presentan una enorme variabilidad. Saravacos (1995) y Saravacos y Maroulis (2001), ofrecen una clasificación general de los métodos para el cálculo de coeficientes efectivos de difusión para sistemas sólidos y semisólidos, los cuales se presentan en el cuadro 1.

Para la difusión en estado no estacionario y flujo en una sola dirección de la segunda ley de Fick se expresa como:

$$\frac{dX}{dt} = D \frac{d^2 X}{dx^2} \quad (4)$$

En donde  $X$  es el contenido de humedad,  $D$  es el coeficiente de difusión del agua,  $x$  es la distancia y  $t$  es el tiempo (Lobo, 1997; Saguy, 1980; Saravacos y Maroulis, 2001).

La ecuación 4 puede resolverse para diferentes tipos de cuerpos (esferas, placas y barras) con diversas dimensiones y geometrías (circular, cuadrada y rectangular). Resolver la Ley de Fick en estado transiente, para un cuerpo de geometría finita, puede llevar a obtener soluciones complicadas, para simplificar este problema se puede estudiar el fenómeno empleando geometrías infinitas; en



**Cuadro 1.** Métodos para determinar la difusividad.

1. Cinética de porción a) Gravimétricos b) Cromatográficos
2. Permeabilidad a) Tiempo de retardo b) Estado estacionario
3. Distribución del material que se difunde
4. Cinética de secado a) Difusividad constante b) Difusividad variable i. Simplificado ii. Simulación iii. Numéricos iv. Régimen regular

Saravacos y Maroulis, 2001.



las geometrías infinitas la transferencia se da solamente a través de una dimensión y el área de transferencia es mucho mayor que las demás superficies del sólido (Turhan y Erdoğan, 2004). Para el caso de una placa infinita en la que el flujo se da dentro de la región  $0 \leq x \leq L$  ( $L$  es el espesor de la placa) y con las siguientes condiciones iniciales y límite (Saguy y col., 1980).

$$\begin{aligned} X &= X_0 & a & t = 0 & \text{para todo } x \\ X &= X_e & a & x = 0, L & \text{para todo } t > 0 \end{aligned}$$

Donde  $X_0$  es el contenido inicial de humedad,  $X_e$  es el contenido de humedad en el equilibrio; la solución que se obtiene es de la siguiente forma:

$$E = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{\pi^2(2n+1)^2}{L^2} Dt\right] \quad (5)$$

$E$  es la concentración adimensional de humedad<sup>1</sup>. En el periodo de velocidad decreciente donde  $E \leq 0.6$  (Brennan, 1980; Saguy y col., 1980) solo el primer término de la serie en la ecuación 5 es tomado en cuenta y se obtiene:

$$E = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 Dt}{L^2}\right] \quad (6)$$

La ecuación 6 puede ser utilizada para el cálculo de la difusión efectiva del agua en el alimento a partir de datos de la cinética de secado; la difusión de agua ( $D$ ) es sustituida por la difusión efectiva de agua ( $D_{efw}$ ).

---

<sup>1</sup> Para una explicación detallada sobre el desarrollo matemático para llegar a la ecuación 5 a partir de la ecuación 4 y bajo las condiciones iniciales y límite especificadas en esta sección, consultar Lobo (1997).



### **3.3. Secado**

El secado es una operación que involucra, desde el punto de vista de la ingeniería, los fenómenos de transferencia de masa y de calor. Para estudiar el fenómeno de secado existen diversos procedimientos, que por lo general comienzan por pruebas a nivel laboratorio y piloto, para posteriormente llegar a una escala industrial, en el caso de que este fuera el objetivo (Geankoplis, 1982; Karel, 1975; Kemp y col., 2001).

En el caso de los estudios a nivel laboratorio son diversas las formas y equipos utilizados en la determinación de la cinética de secado de un material alimenticio.

Varios autores han reportado instrumentos y sistemas de medición, que emplean controles automáticos o semiautomáticos para obtener la cinética de secado de diversos materiales y en muy distintas condiciones (Arámbula y col., 1999; 2000; Boudhriou y col., 2003; Kemp y col., 2001; Sabarez y col., 1999; Toğrul y col., 2003; Yamamoto y col., 2000). A pesar de esta diversidad de instrumentos, es posible clasificar en las siguientes categorías los métodos para la obtención de datos de cinética de secado (Kemp y col., 2001):

1. Muestreo periódico en el que una muestra o el material completo puede ser retirado a intervalos de tiempos fijos, para determinar su masa (en una prueba no destructiva) y después es colocada de nuevo en el secador; estos métodos son lentos y aportan pocos puntos para ser representados gráficamente.



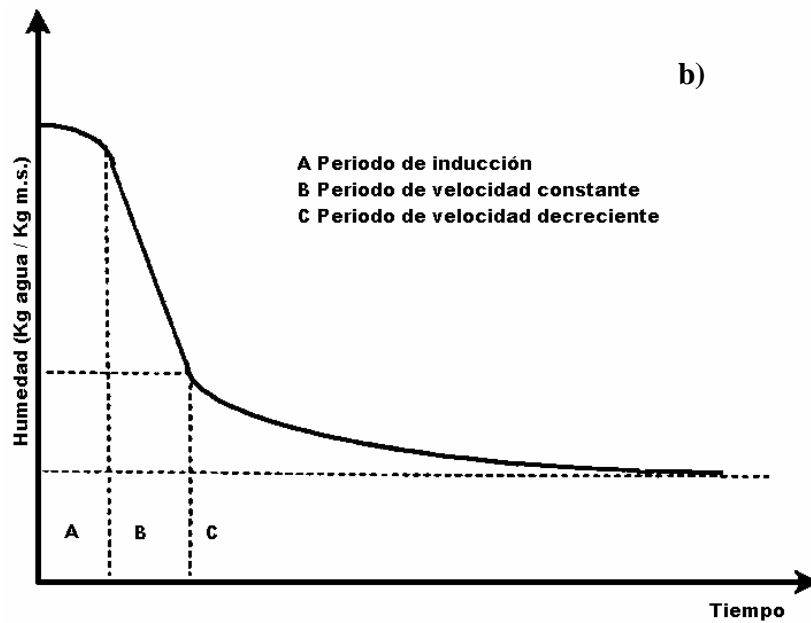
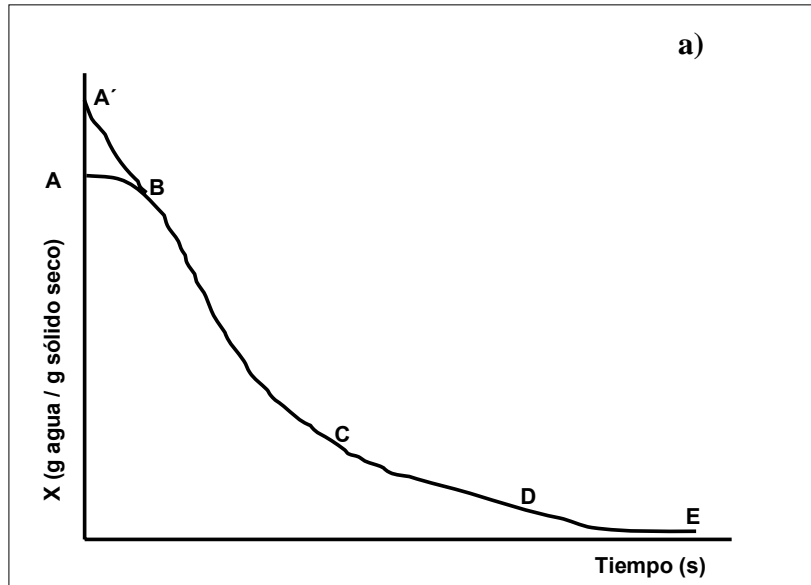
2. Muestreo continuo, en este método la muestra es colocada sobre una balanza de precisión suspendida dentro del equipo de secado, la masa es registrada continuamente obteniendo así un número grande de puntos sobre una gráfica de humedad-tiempo. Puede representarse ruido en los datos por el movimiento de la muestra en la corriente de aire.
3. Muestreo intermitente, la muestra se monta en una balanza dentro de un equipo con una corriente de aire que es detenida o desviada a intervalos fijos, para poder obtener el dato de masa una vez que el sistema se ha estabilizado. Los datos no son afectados de manera importante si el tiempo de secado es corto.
4. Métodos indirectos, en este caso la medición de la velocidad de pérdida de agua del material es a través de la velocidad de formación de vapor, utilizando métodos como el analizador del infrarrojo para después calcular la velocidad de pérdida de humedad.

### **3.3.1. Cinética de secado**

Existen diversas representaciones gráficas de los datos que se obtienen de un experimento de secado. A continuación se describen las más usuales (Geankoplis, 1982; Karel, 1975; Kemp y col., 2001; Treybal, 1995):

1. Curva de secado de contenido de humedad contra tiempo ( $X$  vs.  $T$ ). Los datos de pérdida de masa que se obtienen del experimento de secado son trazados en una gráfica contra el tiempo que se requirió para que se llegara a la humedad de equilibrio, (figura 4); es común que se realice una conversión de los datos expresados en masa de sólido húmedo a datos de masa de sólido seco (Geankoplis, 1982).





**Figura 4.** a) Curva de contenido de humedad contra tiempo (Geankoplis, 1982), b) Curva típica de materiales muy húmedos en la que se observan tres zonas características (Casp y Abril., 1999).



Para convertir los datos en base húmeda a datos en base seca ( $X_t$ ) se realiza el siguiente cálculo:

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \quad (7)$$

En donde  $W$  es la masa del sólido húmedo en gramos totales a  $t \geq 0$  y  $W_s$  es la masa del sólido seco en gramos. Una vez que se ha llegado a la humedad de equilibrio ( $X_e$  en g de agua /g de sólido seco) a condiciones de secado constantes, se calcula el valor del contenido de humedad libre ( $X$  en g de agua libre/g sólido seco) para cada valor de la humedad ( $X_t$  a los diferentes intervalos de tiempo con la siguiente ecuación:

$$X = X_t - X_e \quad (8)$$

Con los valores de  $X$  se traza la curva de secado de contenido de humedad libre contra tiempo.

2. Curva de velocidad de secado contra tiempo ( $d/dt$  vs.  $T$  o  $R$  vs.  $T$ ), (figura 5). Esta se obtiene directamente de los datos de masa del material secado a diferentes tiempos, a través de la diferenciación de la curva de contenido de humedad contra tiempo. Las pendientes de las tangentes a la curva se puede medir para obtener los valores de  $dX / dt$  para determinados intervalos de tiempo.

Para obtener la velocidad de secado ( $R$ ), se emplea la expresión siguiente:

$$R = -\frac{W_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad (9)$$

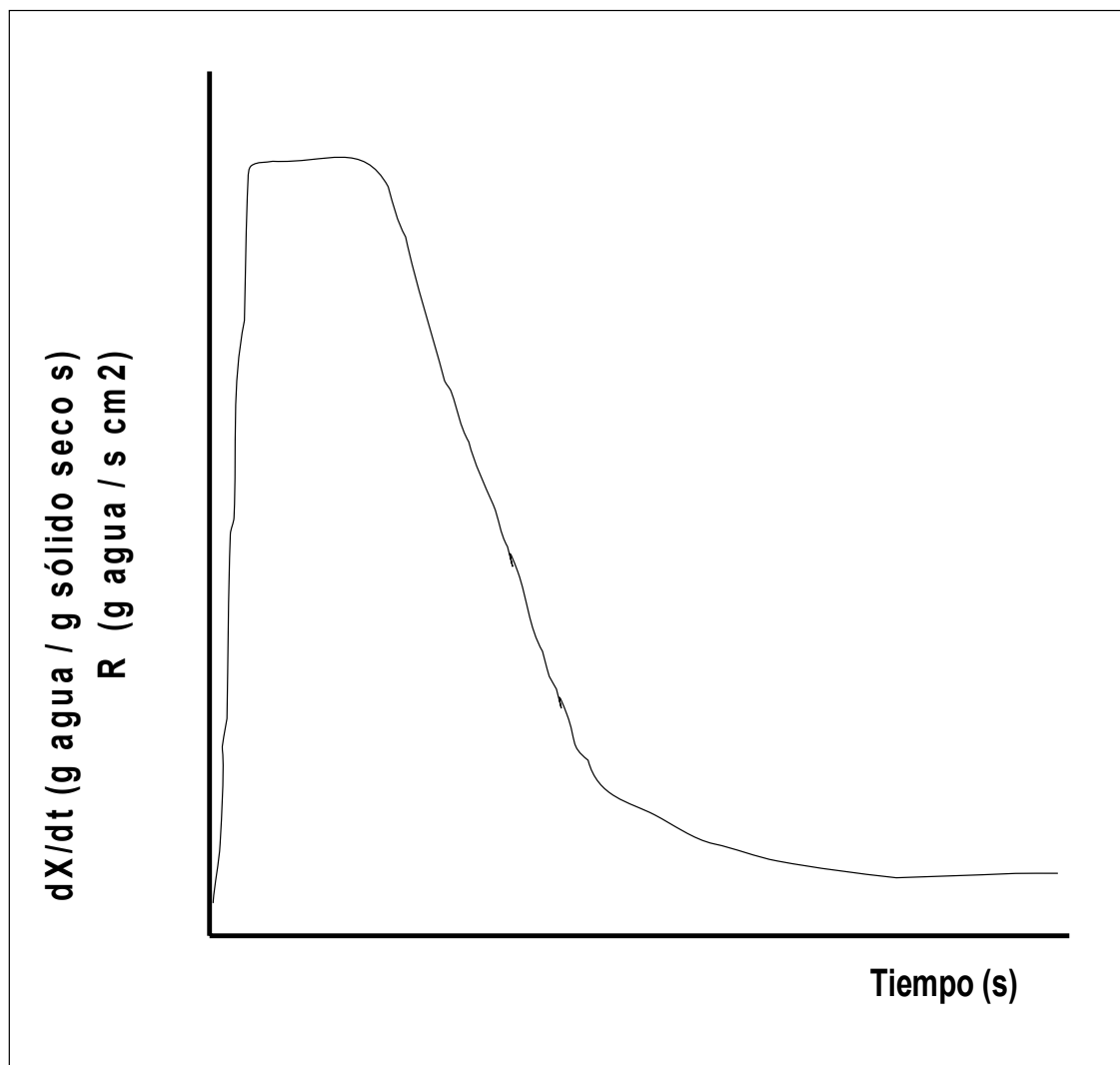


Figura 5. Curva de velocidad de secado-tiempo (Geankoplis, 1982).



Donde  $R$  es la velocidad de secado en gramos agua/  $\text{cm}^2$  s,  $W_s$  es la masa total del sólido seco, en g de sólido seco y  $A$  es el área superficial expuesta al secado en  $\text{cm}^2$ .

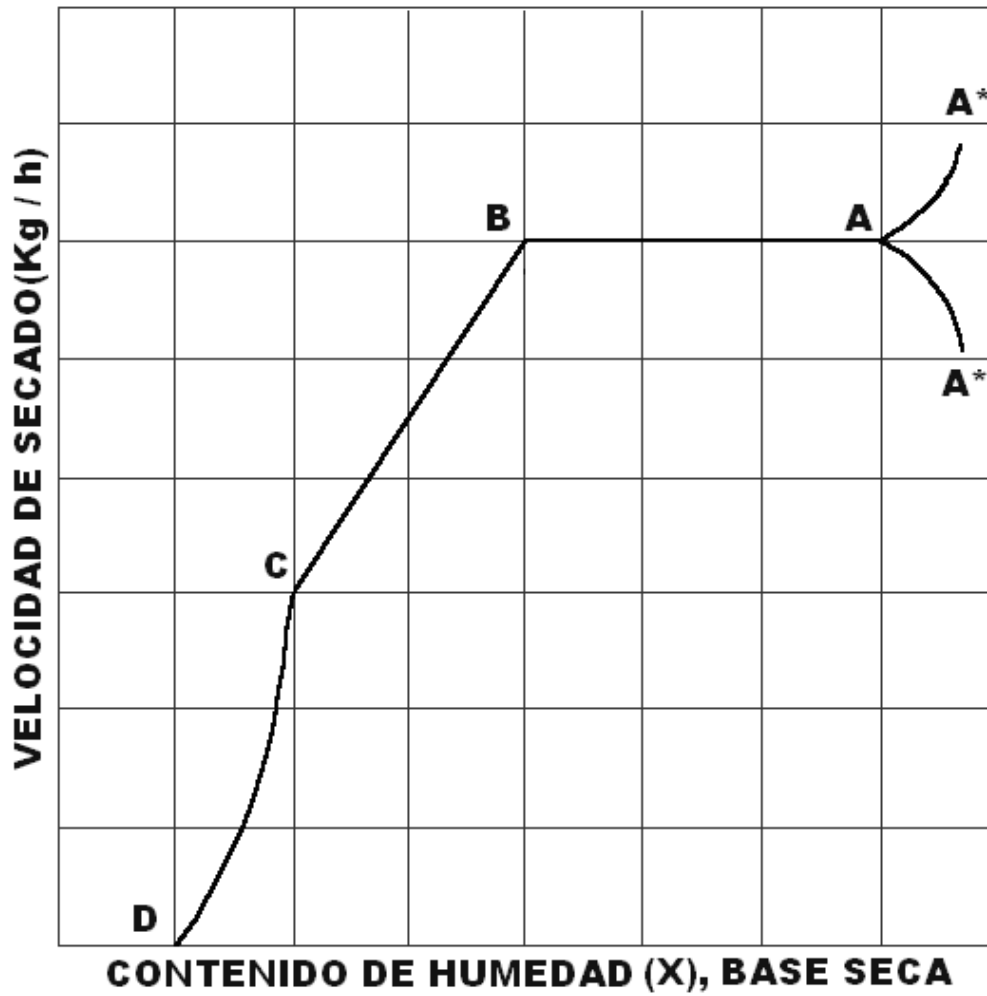
Otra forma de obtener la curva de velocidad es calculando la pérdida de peso ( $\Delta X$ ) para un intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ), entonces la ecuación 6 se convierte en:

$$R = -\frac{W_s}{A} \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (10)$$

Donde  $\Delta X$  es igual a  $X_2 - X_1$  y  $\Delta t$  es igual a  $t_2 - t_1$ . La  $R$  calculada de esta manera es la media en el periodo de  $t_1$  y  $t_2$  y se traza en un gráfico contra el contenido de humedad libre promedio,

$$(X = (X_1 + X_2) / 2)$$

3. Curva de Krischer o curva independiente del tiempo ( $dX / dt$  vs.  $X$  o  $R$  vs.  $X$ ). En esta curva, mostrada en la figura 6, los datos de velocidad de pérdida de masa ( $dX/dt$  o  $R$ ), se colocan en función del contenido de humedad del material ( $X$ ). Esta curva se obtiene combinando la curva de contenido de humedad contra tiempo y la curva de velocidad de secado contra tiempo.
4. Curva de temperatura contra tiempo. En esta curva, mostrada en la figura 7, se representa el perfil de temperatura de la muestra conforme el experimento transcurre.



**Figura 6.** Curva de velocidad de secado-humedad o curva de Krischer, (AB= Periodo de velocidad constante; B= Contenido critico de humedad; BC= Primer periodo de velocidad decreciente; CD= Segundo periodo de velocidad decreciente) (Kemp y col., 2003)

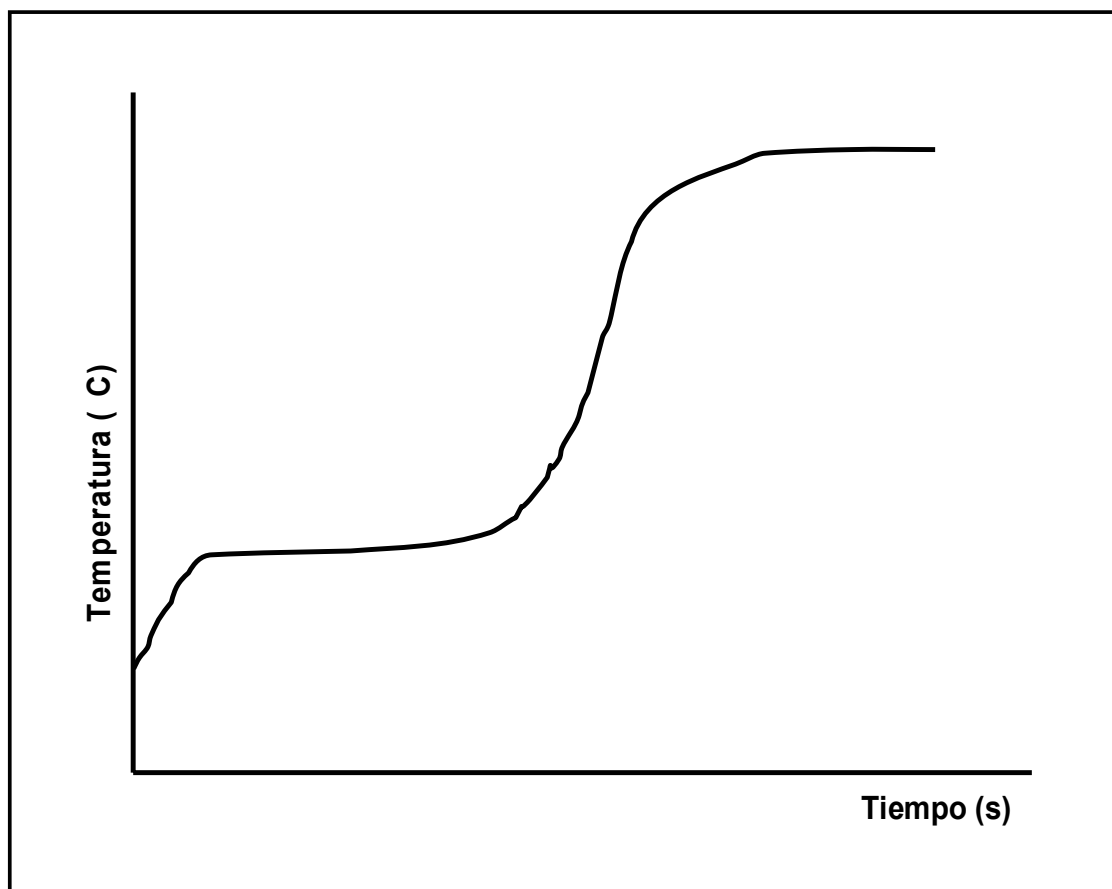


Figura 7. Curva de temperatura-tiempo (Kemp y col., 2003)



Otra forma de representar la cinética de secado es a través de curvas de variables normalizadas (adimensionales), en las que los valores varían entre cero y la unidad. Un grupo de curvas de velocidad de secado de un mismo material, obtenidas dentro de cierto intervalo de condiciones, son geoméricamente similares y se pueden aproximar a una sola curva característica mediante la normalización de las variables. La velocidad de secado característica, que es una variable normalizada, se representa por medio de la ecuación:

$$f = \frac{R_v}{R_w} \quad (11)$$

Donde  $f$  es la velocidad de secado característica,  $R_v$  es la velocidad de secado para una unidad de superficie a  $t > 0$  y  $R_w$  es la velocidad inicial de secado o la velocidad de secado cuando la superficie del sólido esta saturada de líquido.

Al igual que  $f$ , la concentración adimensional de humedad  $\epsilon$  presentada en la ecuación 5, es también una variable normalizada; también existen variables adimensionales para el tiempo y la distancia (Lobo, 1997; Menon y Mujumdar, 1987). En la figura 8 se presenta una curva característica de velocidad de secado (E contra  $f$ ). Fernández (2003), definió como variable normalizada al peso relativo remanente o masa normalizada, la cual se expresa en este trabajo:

$$mn = \frac{W}{W_0} \quad (12)$$

Donde  $mn$  es la masa normalizada,  $W$  es la masa del sólido húmedo a  $t \geq 0$  y  $W_0$  es la masa del sólido húmedo a  $t = 0$ .

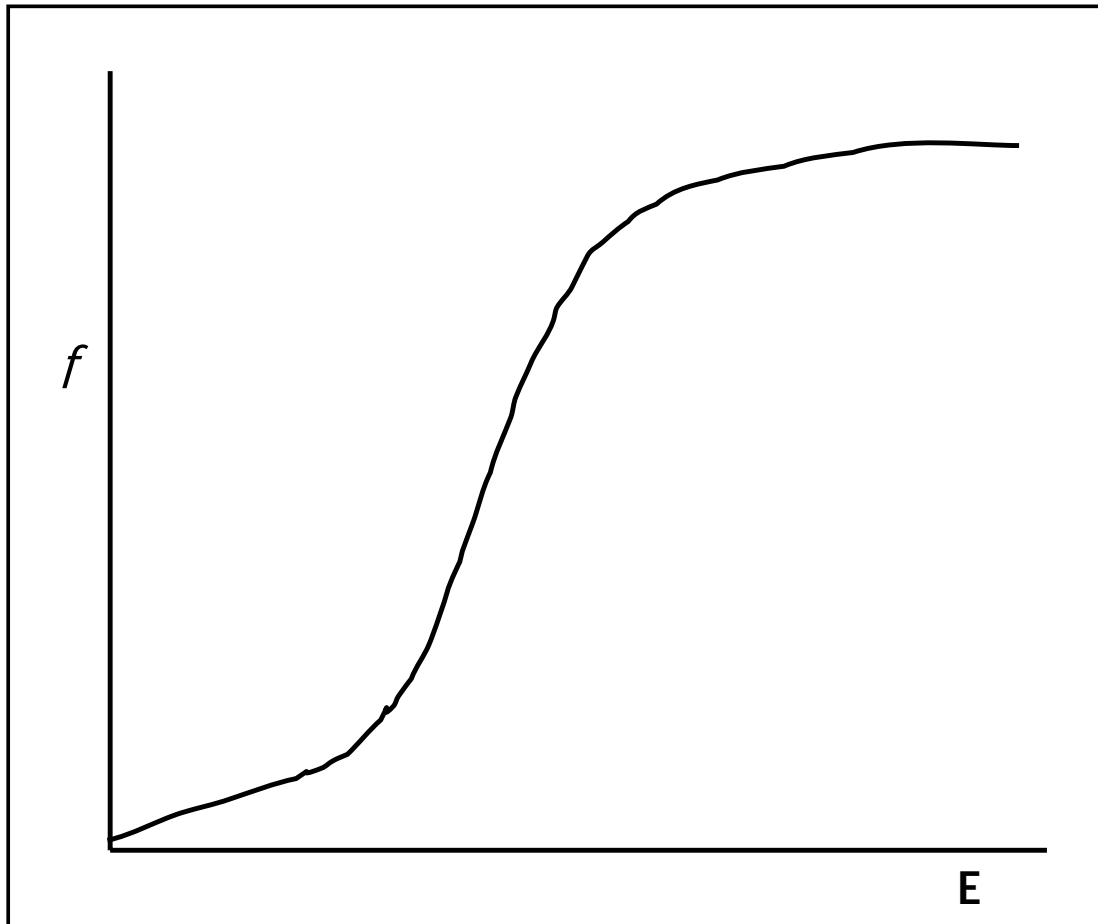


Figura 8. Curva característica de velocidad de secado (Menon y Mujumdar, 1987)





### **3.3.2. Etapas de una curva de cinética de secado**

En el secado con aire caliente a condiciones constantes de un material hidroscópico con geometría de placa y que es secado por ambas caras (Karel, 1975), en la curva de secado (figura 4) pueden presentarse los periodos representados por las secciones A-B O A'-B, B-C, C-D Y D-E. El periodo A-B se presenta cuando el sólido se encuentra a una temperatura inferior de la que tendrá al final; la rapidez de evaporación aumenta cuando la temperatura superficial aumenta hasta su valor final durante el periodo A-B. El periodo A'-B se presenta mientras se da un ajuste inicial, en el caso de que el sólido este a una temperatura alta al iniciar el proceso de secado. Los periodos A-B y A'-B generalmente, son tan cortos que se ignoran, si el cálculo del tiempo de secado, es el objetivo. El periodo B-C es llamado periodo de velocidad constante de secado, en esta parte de la curva la pendiente y la velocidad de secado son constantes. Las secciones C-D y D-E representan periodos de velocidad decrecientes. Por lo general el periodo C-D, en una curva de velocidad de secado-humedad, es lineal. La velocidad de secado disminuye con mayor rapidez en un segundo periodo de velocidad decreciente, representado por la sección D-E. En el punto E el contenido de humedad es igual al contenido de humedad de equilibrio.

Los periodos de velocidad decreciente (C-D y D-E) son de mayor importancia, pues durante estos se presenta la mayor pérdida de masa de los materiales que son sometidos a secado. La región C-D no existe para algunos materiales o es el único periodo de la velocidad decreciente. Cada periodo de la curva de secado esta asociado a los diferentes tipos de transporte de agua que se pueden presentar y al estado que presente el agua en el material (Geankoplis, 1982; Ocon y Tojo, 1972; Treybal, 1995).



### **3.3.2.1. Periodo de velocidad constante**

El periodo de velocidad constante, fragmento B-C de las curvas de las figuras 4 y 6, se presenta cuando el material que se somete al proceso de secado, al inicio se encuentra muy húmedo; es decir, presenta una capa de agua líquida continua sobre su superficie. El agua de esta capa se comporta como agua libre. Al entrar en contacto el material con el aire de secado la evaporación se da en la superficie y la velocidad de evaporación no depende del material sólido; la resistencia del movimiento del agua desde el interior del sólido hasta su superficie es despreciable. Para un material poroso, en el que es posible tener capilares por los que se conduce líquido hasta la superficie, la película superficial de agua puede mantenerse, si la velocidad con la que el agua atraviesa por los capilares hasta llegar a la superficie, es igual que la velocidad con la que se evapora el agua superficial. Como las condiciones del aire de secado son constantes, es decir, que la humedad y temperatura del aire no cambia y que la humedad en la superficie del sólido es constante, la velocidad con la que se evapora el agua es constante (Geankoplis, 1982; Ocon y Tojo, 1972; Treybal, 1995).

### **3.3.2.2. Periodo de velocidad decreciente**

En el periodo de velocidad decreciente, fragmento C-D (figura 4), la cantidad de agua en la película superficial comienza a disminuir, observándose regiones secas en la superficie; estas ocuparan cada vez una mayor parte de la superficie expuesta al secado. La velocidad de pérdida de humedad por evaporación permanece constante para el total de la superficie húmeda, sin embargo, la velocidad de pérdida de masa del material sólido se determina tomando la superficie total de transferencia, por esta razón la velocidad de pérdida de masa disminuye. Esto da lugar a la primera parte del periodo decreciente de velocidad, sección C-D; en el punto C, el contenido de humedad en el material, es el



contenido crítico de humedad,  $X_c$ . En el punto D, la capa superficial del líquido ha desaparecido totalmente. En la región D-E, la rapidez con la que se mueve la humedad en el interior del sólido es menor; en el plano de la superficie de secado comienza a desplazarse hacia el interior del sólido. En el punto E se ha alcanzado el contenido de humedad de equilibrio, es decir, el sólido no cede ni absorbe agua del medio de secado. La cantidad de agua que se pierde durante el periodo de velocidad decreciente es baja, pero requiere de bastante tiempo para eliminar agua durante este periodo (Geankoplis, 1982; Ocon y Tojo, 1972; Treybal, 1995).

### **3.3.3. Psicrometría**

En el secado el aire húmedo es el medio empleado para eliminar el agua de un material húmedo; este se compone por una mezcla de gases, en proporciones constantes, y por vapor de agua. Para realizar cálculos basados en las propiedades de la mezcla aire- vapor de agua se requiere conocer la cantidad de agua presente en el aire a diversas condiciones de presión y temperatura. Para conocer el estado de la mezcla es necesario conocer tres variables psicrométricas.

Existe la convención de expresar las cantidades en base de aire seco y de masa de sólido seco, para los procesos de secado. En el cuadro 2 se presentan las principales relaciones psicrométricas, con sus unidades y simbología (Geankoplis, 1982; Pinazo, 1995).



**Cuadro 2.** Relaciones psicrométricas de la mezcla aire-vapor de agua.

Variable	Literal	Ecuación	Unidades
Cantidad de humedad	H	$\frac{18.02}{28.97} \frac{P_A}{P - P_A}$	Kg agua / Kg aire seco
Humedad de saturación	H <sub>S</sub>	$\frac{18.02}{28.97} \frac{P_{AS}}{P - P_{AS}}$	Kg agua / Kg aire seco
Porcentaje de humedad	H <sub>P</sub>	$100 \frac{H}{H_S}$	%
Humedad relativa	H <sub>R</sub>	$100 \frac{P_A}{P_{AS}}$	%
Temperatura de bulbo seco	H <sub>BS</sub>		°C
Temperatura de bulbo húmedo	H <sub>BH</sub>		°C
Temperatura de rocío	T <sub>R</sub>		°C
Calor húmedo de la mezcla	C <sub>S</sub>	1.005+1.88 H	KJ / Kg aire seco
Entalpía de la mezcla	H <sub>Y</sub>	$C_s (T - T_0) + H \lambda_0$	KJ / Kg aire seco
Valor húmedo de la mezcla	V <sub>H</sub>	$\frac{22.41}{273.15} T \left( \frac{1}{28.97} + \frac{1}{18.02} H \right)$	m <sup>3</sup> / Kg aire seco

Adaptado de Geankoplis, 1982.



### **3.4. Definición de harina de maíz nixtamalizado**

El harina de maíz nixtamalizado ha sido definida como el producto obtenido después aplicar una modificación al proceso tradicional de nixtamalización (Gómez y col. 1991). En el proceso industrial el grano no está suficientemente cocido, esto causa en el grano insuficiente absorción de agua, causando debilitamiento de la estructura del endospermo, restringiendo el hinchamiento de los gránulos de almidón y limitando la lixiviación de la amilosa durante la fase inicial de calentamiento. La diferencia principal del proceso para elaboración de harinas nixtamalizadas con el proceso tradicional, radica principalmente en los cortos tiempos de reposo.

#### **3.4.1. Propiedades funcionales de la masa de maíz nixtamalizado**

El nixtamal obtenido del cocimiento alcalino del maíz puede llevarse a un proceso de molienda en húmedo para obtener masa, que será la base para la elaboración de diversos productos alimenticios, principalmente tortillas. También después de la molienda en húmedo puede ser sometido a una operación de secado y finalmente a una segunda molienda, para producir harina de maíz nixtamalizado con la que se forma masa con la adición de agua.

La masa de nixtamal debe cumplir con ciertas características sensoriales, como sabor y aroma particulares y con la cualidad de desarrollar la propiedad de flexibilidad, una vez que ha sido transformada en tortilla (Arámbula y col., 2000; Badui, 1999). Aun cuando la masa es una mezcla de almidón, proteínas, lípidos y fibra, las propiedades funcionales que desarrolla se deben especialmente a los cambios que sufren el almidón y los componentes del pericarpio a lo largo del proceso de nixtamalización.



En los granos de cereales el almidón se encuentra en forma de gránulos insolubles en agua; generalmente, los granos no sufren modificaciones durante algunos procesos, como la extracción del almidón y la molienda de granos. En el caso de la nixtamalización, el almidón sufre una gelatinización parcial (en el cocimiento, en el reposo, en la molienda y en el cocimiento o secado de la masa).

Los gránulos gelatinizados pueden funcionar como pegamento, pero es el pericarpio remanente, que ha sido transformado en gomas solubles, el componente que da cohesividad a la masa (Arámbula y col., 2000). Se ha propuesto que el pH alcalino y el calor provocan el rompimiento de algunos puentes de hidrógeno, además de la disociación de los grupos hidroxilo de las unidades de glucosa de las cadenas de amilosa y de amilopectina, lo que lleva a obtener polímeros con carga negativa y que pueden formar puentes de calcio, formándose una red continua que permite que la masa desarrolle flexibilidad, además de disminuir la retrogradación del almidón. Un almidón completamente gelatinizado en el cocimiento, produce una masa pegajosa que es difícil de manejar, por otro lado, un cocimiento deficiente, produce una masa que no presenta cohesividad (Arreola, 1998; Badui, 1999).

Parte de los lípidos se saponifican, se libera niacina y se solubilizan parte de las proteínas que rodean a los gránulos de almidón. La liberación de niacina, un aminoácido esencial, durante la nixtamalización tiene mayor importancia desde el punto de vista nutricional, que del de desarrollo de propiedades funcionales. Las proteínas del maíz se localizan en el endospermo en forma de cuerpos proteicos discretos y de una matriz proteica. La prolamina zeína, es la proteína característica del maíz, los puentes disulfuro de la molécula, no se rompen en condiciones alcalinas; los restos de prolina presentes hacen rígida a la molécula.



La zeína tiene poca solubilidad en agua, lo anterior podría explicar el que la proteína del maíz no es determinante para que se desarrolle la propiedad de flexibilidad (Arreola, 1998; Badui, 1999).

En el sistema complejo formado, la reasociación de la amilosa y amilopectina, dependen del tiempo y la temperatura, lo que constantemente cambia el contenido y la distribución del agua; esto se refleja en las propiedades reológicas y de textura de los productos elaborados a partir de masa. La distribución uniforme del agua y del calcio en el nixtamal se consigue durante la etapa de reposo (Bello y col., 2002).

El uso de  $\text{Ca(OH)}_2$  como álcali, es fundamental para conseguir una masa cohesiva y que desarrolle flexibilidad en la tortilla. Con la utilización de iones monovalentes como los que rinden el NaOH y el KOH, no se obtienen buenos resultados, sobre todo en lo relacionado con la propiedades plásticas de la tortilla (Badui, 1999).

Las tortillas de masa hecha con la harina de maíz nixtamalizado, comparadas con las provenientes de masa producida directamente con la molienda húmeda del nixtamal, tienen una calidad en cuanto a textura y a sabor menor. Hay que tomar en cuenta que para producir harina de maíz nixtamalizado, se tiene un proceso térmico más, que es el de secado.

### **3.5. La tortilla**

En México la tortilla forma parte de la dieta de todos los estratos sociales, con un consumo anual aproximado de 12 millones de toneladas (INEGI, 2000).

Aunque el consumo de este producto es alto, no existe homogeneidad en las características de calidad finales de las tortillas producidas comercialmente. Esta variabilidad se debe, en parte, a la falta de control de calidad, a la baja calidad del



grano, a la utilización de equipo de proceso obsoleto y a la deficiencia en equipos/métodos/técnicas probadas, para determinar objetivamente las características de textura de las tortillas.

Se ha reportaron a la textura de la tortilla como la fuerza máxima y el área total de la curva de tensión obtenida con el equipo Instron Universal (Rooney, 1982), utilizando como muestra una tortilla completa, pero las conclusiones fueron hechas con base a un análisis sensorial desarrollado paralelamente. Bedolla y Rooney (1984) utilizaron el término "rolabilidad", como una forma subjetiva de evaluar la textura de la tortilla. Esta prueba consistió en enrollar una tortilla, en forma de taco, y medir el grado de rompimiento de acuerdo a una escala hedónica de 5 puntos. El grado de rompimiento de las tortillas se evaluó en forma subjetiva utilizando una escala del 1 al 5, donde 1 correspondió a un rompimiento de 0%, 2, a un rompimiento de 1 a 25%, 3, de 26 a 50%, 4, de 51 a 75% y 5 desde 76 a 100% de rompimiento de la longitud de la tortilla.

### 3.6. Los humectantes

Los humectantes son sustancias químicas que tienen la capacidad de retener la humedad de los alimentos, es decir; retrasan la deshidratación de los mismos. La mayoría de estas sustancias pertenecen al grupo de los polialcoholes de bajo peso molecular (Fennema, 2000).

#### Glicerol

Un alcohol de azúcar trihidroxilado (figura 9) que es un intermediario en el metabolismo de los carbohidratos y de los lípidos. Se usa como solvente, emoliente, agente farmacéutico, agente humectante y agente edulcorante.



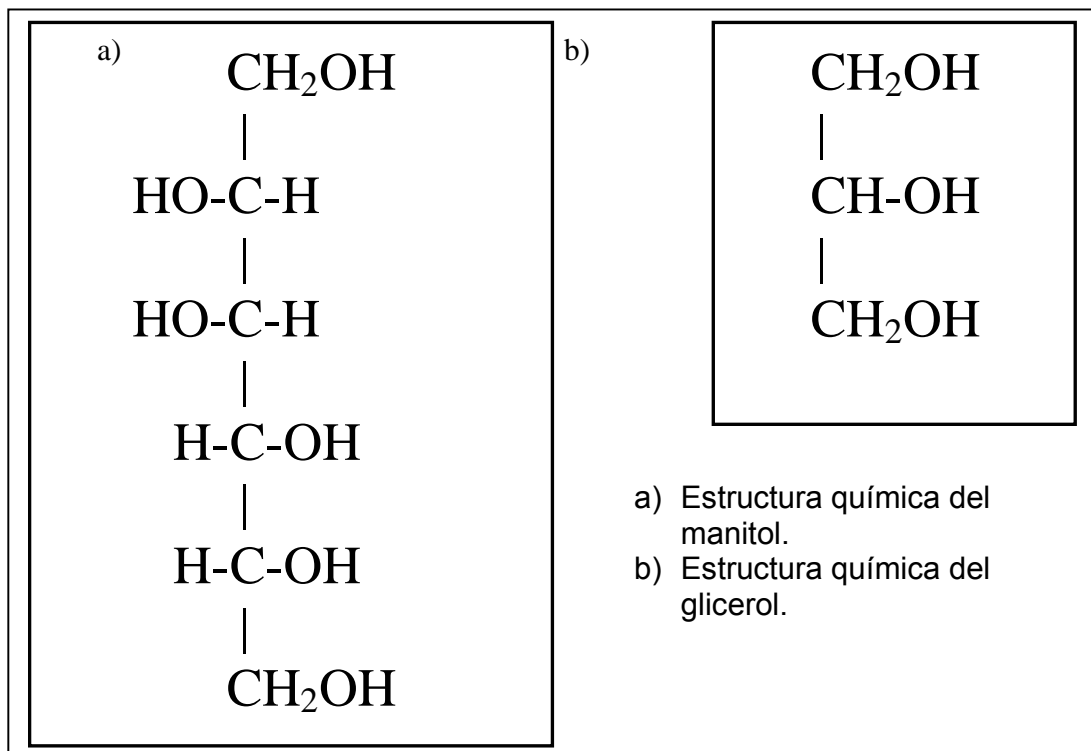


Figura 9. Estructura química del manitol y glicerol (Fennema, 2000).



### Manitol

Un diurético y adyuvante en el diagnóstico renal relacionado al sorbitol. Posee poco valor calórico y es eliminado del cuerpo antes que pueda tener lugar su metabolismo. El manitol es también comúnmente utilizado como herramienta diagnóstica en estudios de biología celular (figura 9).



# Objetivos



## *Capítulo IV*

### *OBJETIVOS*

#### **4.1. Objetivo general**

Evaluar el efecto de dos humectantes sobre la cinética de secado, los coeficientes de difusión efectiva y la roabilidad de tortillas elaboradas con harina de maíz nixtamalizado comercial (Maseca).

#### **4.2. Objetivos particulares**

1. Evaluar el efecto de dos humectantes (manitol y glicerol) sobre las cinéticas de secado de tortillas elaboradas con harina comercial de maíz nixtamalizado (HMN).
2. Evaluar los coeficientes de difusión efectiva del agua bajo la influencia de dos humectantes diferentes, manitol y glicerol (0, 0.5, 1 y 1.5%) en tortillas elaboradas con HMN a una temperatura de 50°C.
3. Evaluar la roabilidad de tortillas elaboradas con HMN y dos diferentes humectantes.



# Metodología experimental



## *Capítulo V*

### *METODOLOGÍA EXPERIMENTAL*

#### **5.1. MATERIALES E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN**

En este trabajo experimental para obtener las curvas de cinética de secado se utilizaron como materiales:

- ❖ Manitol en polvo (J. T. Baker, E.U.A.).
- ❖ Glicerol puro (Cruz Blanca, Pachuca Hgo.).
- ❖ Harina de maíz nixtamalizado (Maseca, Edo. de México).
- ❖ Agua purificada embotellada (Bonafont, Toluca, Edo. de México).

Los instrumentos empleados fueron:

- ❖ Una termobalanza de alta precisión modelo MB 45 Halogen Moisture Analyzer con capacidad de 500 g (Ohaus, U.S.A.).
- ❖ Una balanza de alta precisión Ohaus modelo Explorer con capacidad de 410 g (Ohaus, E.U.A.).
- ❖ Una estufa Shel Lab
- ❖ Una parrilla simultánea Fisher Scientific.
- ❖ Una computadora personal.
- ❖ Vernier mecánico de 20 cm. de longitud
- ❖ Tortilladora mecánica comercial

Descripción del sistema de comunicación entre la termobalanza y la computadora:

Se utilizó una computadora personal (PC) para establecer comunicación directa por cable (Hyper terminal) con la termobalanza Ohaus, el cable empleado para la



conexión fue el RS-232 registrando así los datos de masa, temperatura y tiempo. El tiempo para el registro de las masas fue programado a intervalos regulares (cada 30 s) mientras que la temperatura fue constante a 50 ° C, para el análisis de cada uno de los experimentos.

## 5.2. Actividades preliminares

1. Elección de la relación agua-harina de maíz nixtamalizado y el tiempo de amasado para la elaboración de las tortillas. Para esta actividad se probaron las siguientes relaciones agua-harina con respecto al peso de la HMN utilizada:

**Cuadro 3.** Relación agua- HMN para elaboración de tortillas.

Proporción	Cantidad de agua	Cantidad de HMN
1:1	50 mL	50 g
1.5:1	75 mL	50 g
2:1	100 mL	50 g

Primero se pesaron 50 g de HMN y se mezcló con el volumen de agua correspondiente a cada proporción, dejándola reposar durante 2 minutos, después se amasó manualmente durante 5 minutos hasta obtener una masa de consistencia no pegajosa y de buena cohesión. La consistencia no pegajosa se observó cuando la masa no se adhería al recipiente en el que se amasó y la cohesión, se refiere a que la masa no presentó grietas al terminar el amasado. De acuerdo a la consistencia de la masa obtenida se tomó el tiempo y la relación agua-harina adecuada que se emplearía en los experimentos (1.5:1).



2. Elección del tiempo de cocción de las tortillas. Para esta actividad se tomó una porción que se colocó en el centro de la prensa manual, encima de un pedazo de plástico, se le puso encima otro pedazo de plástico, se cerró la tapa de la prensa y se presionó, naturalmente, cuanto mayor fue la presión ejercida, más delgada quedaba la tortilla. La tortilla se extendió sobre el comal caliente a una temperatura aproximada de 300 °C; posteriormente, se tomó el tiempo desde que se colocó la tortilla hasta el momento en el que los bordes de ésta se tornaran más oscuros que el centro (25 segundos) y se volteó, transcurridos 30 segundos más se aplanó un poco manualmente y nuevamente se volteó esperando que se inflara, finalmente fue retirada del comal.

Se elaboraron 5 tortillas de cada una de las formulaciones, las tortillas fueron codificadas con la hora a la que terminó su proceso de cocción, el humectante y la concentración empleados en su elaboración, se midió el diámetro de la tortilla y su espesor con un vernier y se registraron los datos, posteriormente se dejaron expuestas a temperatura y humedad relativa ambiental. Cada experimento se realizó por triplicado.

4. Elección de la concentración de humectante adicionado a las tortillas el estudio de cinética de secado. Fueron elegidos dos humectantes glicerol y manitol, ambos de grado alimenticio sin restricciones de su uso en cuanto a las concentraciones adicionadas a los alimentos y por no existir casos registrados de daños originados al organismo por su consumo y/o acumulación de los mismos (NOM 147-SSA1-1996). Estos se añadieron en tres concentraciones diferentes a la masa empleada para la elaboración de las tortillas, las concentraciones añadidas fueron 0.5%, 1.0% y 1.5% en relación al peso de HMN empleada en cada formulación.





### 5.3. Obtención y registro de datos

1. Cinética de secado de tortillas de HMN. El procedimiento que se realizó en cada experimento para la obtención y registro de los datos de pérdida de peso en función del tiempo de cada una de las tortillas elaboradas se describe detalladamente en el Anexo A.

#### 5.3.1. Tratamiento de los datos de las cinéticas de secado.

En el cuadro 4 se muestran los datos que son requeridos para el desarrollo adecuado de las dos secuencias de cálculo descritas en esta sección.

Para el tratamiento de los datos de peso y humedad se empleó la siguiente secuencia.

- a. Se construyó una gráfica de Krischer (peso de la tortilla vs. tiempo) para evaluar el comportamiento de transferencia de masa de la tortilla con respecto al tiempo de secado. La secuencia de cálculo de la velocidad de secado y de la humedad libre se presenta en la secuencia I.

#### Secuencia I.

**Velocidad de secado ( $R [=]$  g / cm<sup>2</sup> s).**

1. Cálculo del área de secado.

$$A = \pi r^2$$

2. Cálculo de la masa de sólido seco.

$$W_s = W_0 (1 - \chi)$$

3. Cálculo de la humedad en base seca.

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s}$$



4. Cálculo de la humedad libre.

$$X = X_t - X_e$$

5. Cálculo de la humedad libre media.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2}{2}$$

6. Cálculo de la velocidad de secado.

$$R = \frac{W_s (X_1 - X_2)}{A (t_2 - t_1)}$$

Para los cálculos de  $R$  y de  $D_{efw}$  los diferentes valores de masa ( $W$ ) se tomaron cada 30 s., es decir, el incremento del tiempo fue un valor constante de 30 s.

- b. Se calculó el coeficiente efectivo de difusión de agua ( $D_{efw}$ ) empleando la secuencia II.

### Secuencia II.

**Coeficiente efectivo de difusión de agua ( $D_{efw}$  [=]  $\text{cm}^2 / \text{s}$ ).**

1. Aplicando las leyes de los logaritmos a la ecuación 6, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\ln E = \ln \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \ln \frac{8}{\pi} - \frac{D_{efw} \pi^2}{L^2} t \quad (13)$$

A partir de la ecuación 13 se construye una curva como la presentada en la figura 10, correspondiente al valor de  $\ln E$  en función del tiempo para el cálculo del  $D_{efw}$ . Una vez trazada la curva de  $\ln E$  se dibujan las líneas correspondientes a cada zona como lo indica la figura 10.



**Cuadro 4.** Datos requeridos para los cálculos

A	Área de secado, $\text{cm}^2$	X	Contenido de humedad libre, g agua / g sólido seco
R	Radio de la tortilla, cm.	$\bar{X}$	Contenido medio de humedad libre, g agua / g sólido seco
T	Tiempo, s.	$X_e$	Contenido de humedad de equilibrio, g agua / g sólido seco
W	Masa del sólido húmedo a $t > 0$ , g.	$X_t$	Contenido de humedad en base seca, g agua / a sólido seco
$W_0$	Masa del sólido húmedo a $t = 0$ , g.	L	Espesor de la tortilla, cm.
$W_s$	Masa del sólido seco en g. sólido seco	$\lambda$	Fracción de agua en el sólido



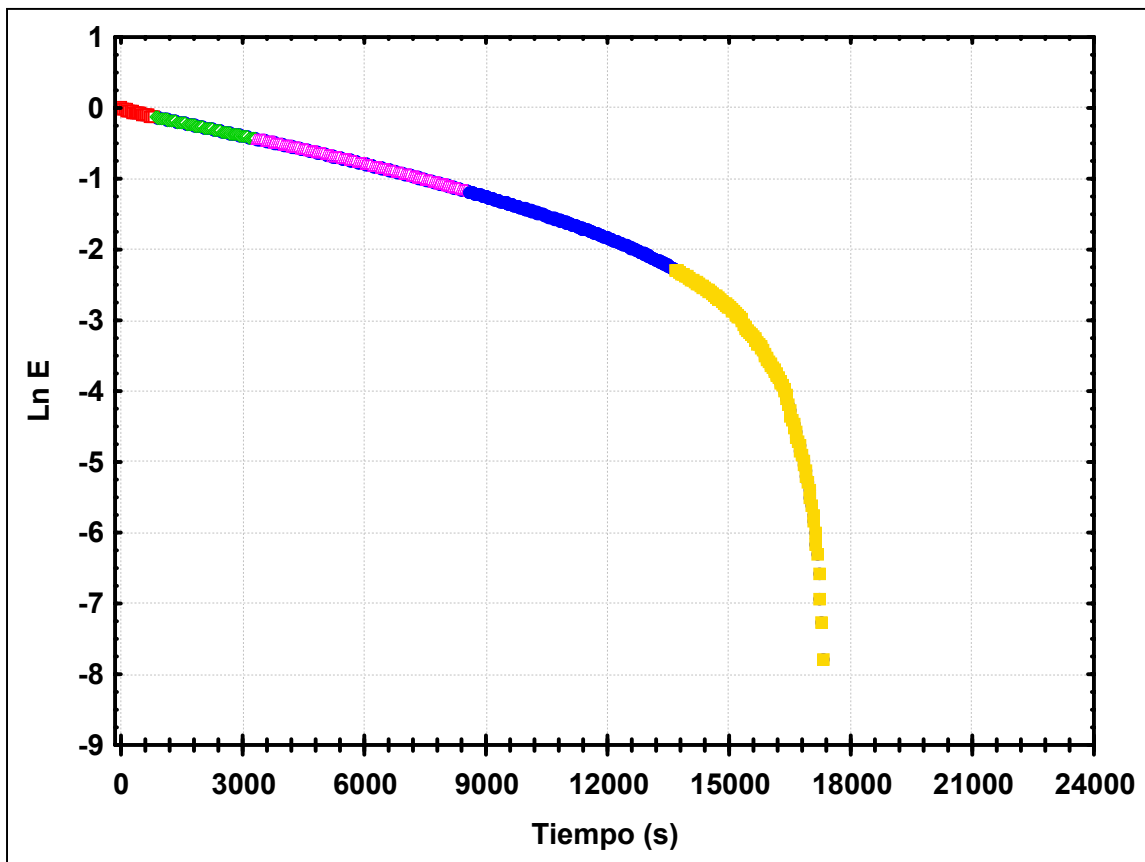
Posteriormente se resuelve la ecuación de la pendiente para cada una de las líneas dibujadas sobre la curva de Ln E contra tiempo y se sustituye el valor obtenido en la ecuación 14. El cálculo de la pendiente ( $m$ ) de la figura 11, se realizó por regresión lineal.

$$D_{efw} = - \frac{L^2 m}{\pi^2} \quad (14)$$

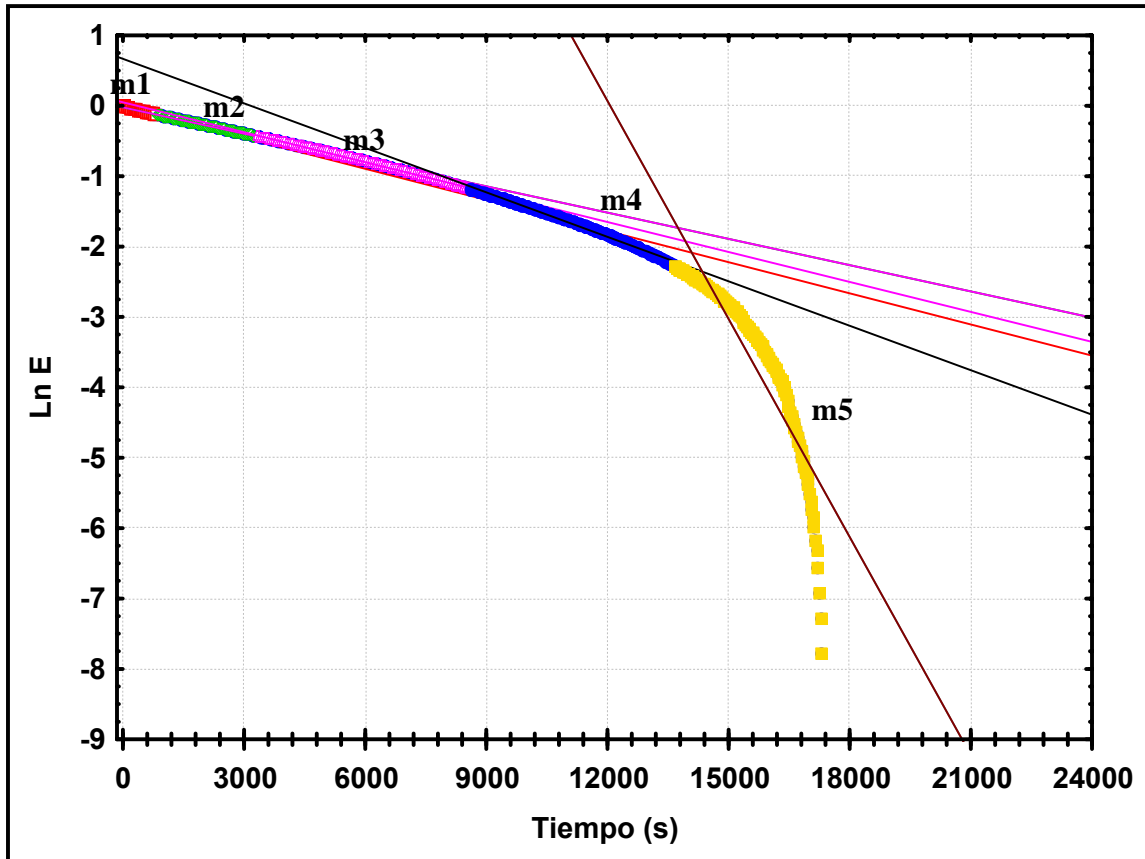
Donde:  $L$  es el espesor de la tortilla cuando el secado se realiza por ambas superficies, si el secado se realiza solo por una superficie el valor de  $L$  se sustituye por  $2L$  en la ecuación (13) (Saravacos y Maroulis; 2001). Para verificar si estadísticamente existía o no diferencia significativa entre los valores de  $D_{efw}$  correspondientes a cada zona de la curva se realizó un análisis de varianza de una sola vía. En el Anexo B se presenta un ejemplo del cálculo de la velocidad de secado y de la humedad libre, así como el  $D_{efw}$ .

#### **5.4. Análisis de textura mediante el parámetro de rolabilidad.**

La rolabilidad es la capacidad que tienen las tortillas para hacerse en forma de taco, sin que se rompan, se determinó usando el método propuesto por Bedolla y Rooney, (1984). La tortilla completa, 30, 60, 90, 120 y 150 minutos, después de elaborada, se codificó con el humectante empleado, la concentración adicionada y el tiempo de reposo, se enrolló alrededor de una varilla de vidrio de 2 cm. de diámetro y se observó el grado de rompimiento. El grado de rompimiento de las tortillas se evaluó en forma subjetiva utilizando una escala del 1 al 5, donde 1 correspondió a un rompimiento de 0%, 2 a un rompimiento de 1 a 25%, 3 de 26 a 50%, 4 de 51 a 75% y 5 desde 76 a 100% de rompimiento de la longitud de la tortilla.

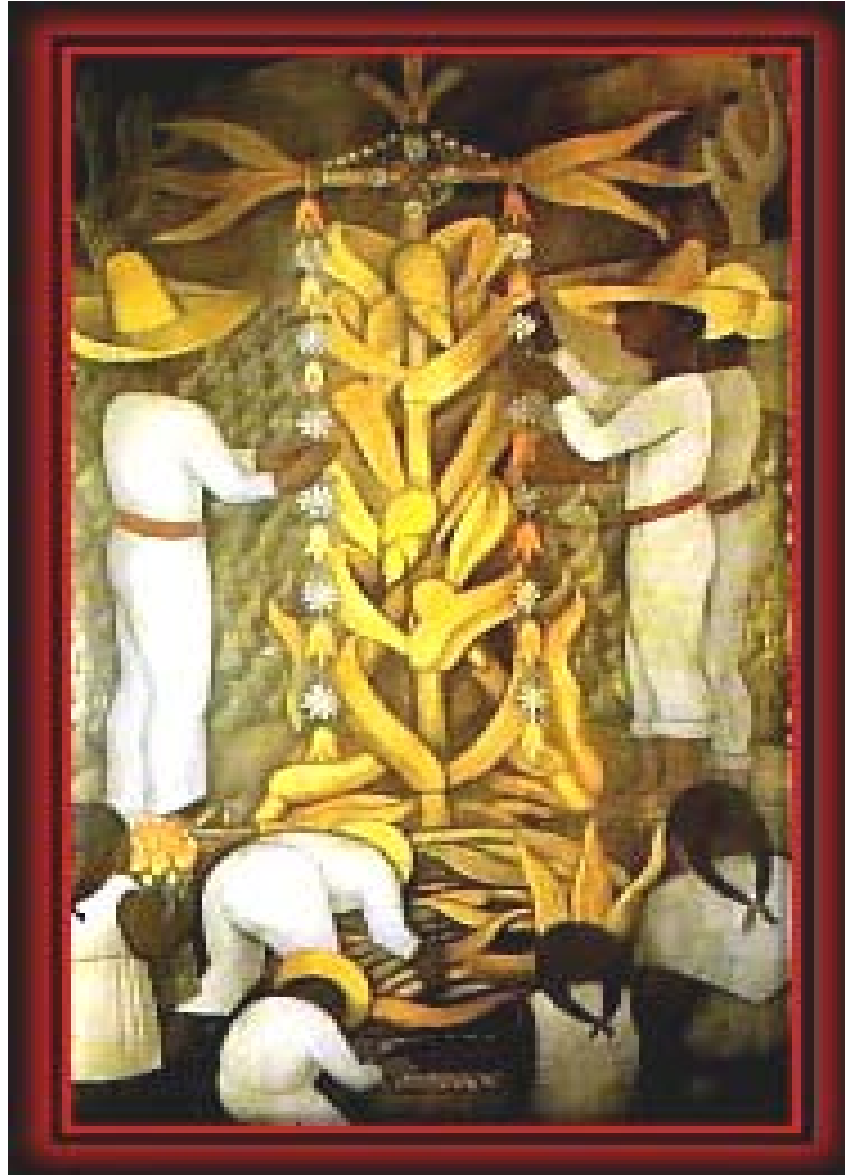


**Figura 10.** Curva de Ln E en función del tiempo para el cálculo de  $D_{efw}$  a partir de las zonas delimitadas en las cinéticas de secado.



**Figura 11.** Valores de las pendientes correspondientes a las líneas trazada para cada zona de la curva de acuerdo a las cinéticas de secado (cada color de la curva indica las cinco zonas).

Zona 1 =  $m_1 = -0.0002127760$   
Zona 2 =  $m_2 = -0.0001795616$   
Zona 3 =  $m_3 = -0.0002045897$   
Zona 4 =  $m_4 = -0.0003037733$   
Zona 5 =  $m_5 = -0.0014903683$



# Resultados y discusiones



## Capítulo VI

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 6.1. Cinéticas de secado de las tortillas

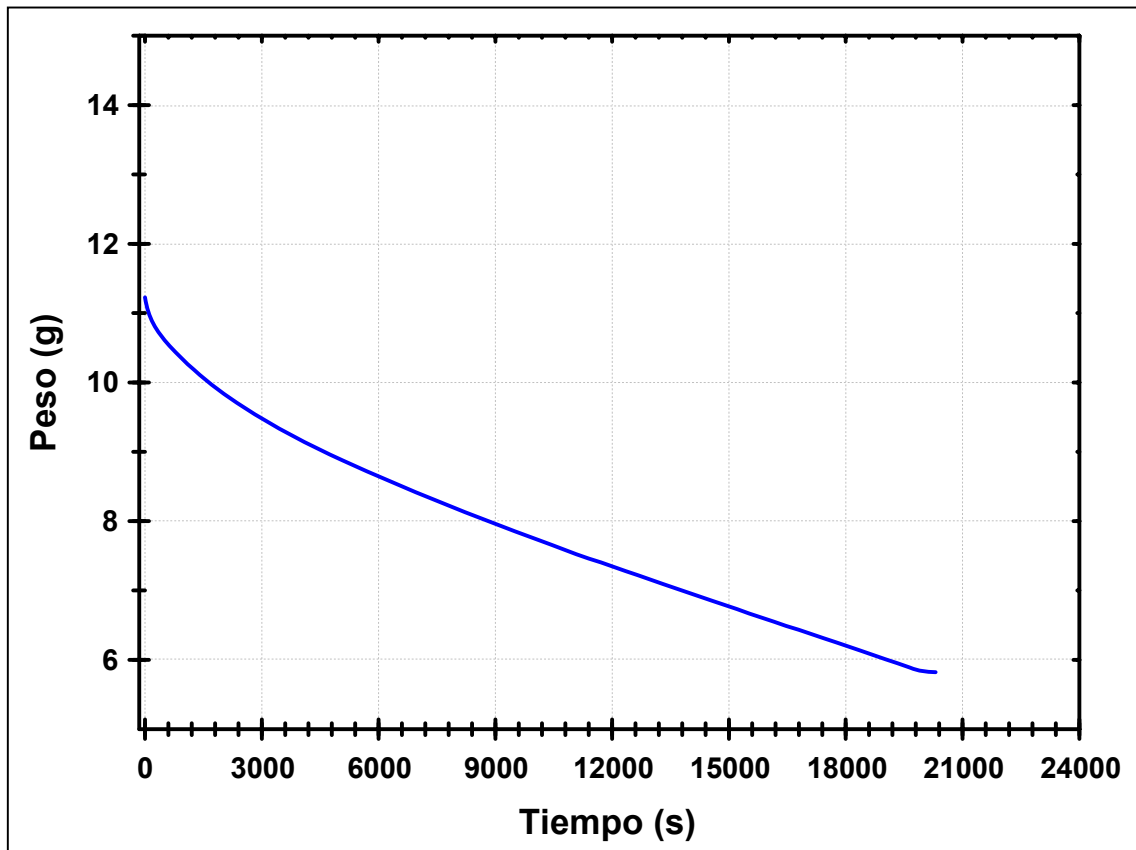
Las cantidades de humectante adicionadas a las tortillas empleadas para realizar las cinéticas de secado como se mencionó en el capítulo V fueron 0.5%, 1.0% y 1.5% en relación al peso de la HMN. Las condiciones de secado fueron humedad relativa ambiente, una temperatura controlada de 50 °C, terminándose el secado hasta que ya no se observó pérdida de peso en cada muestra.

La cinética de secado es un proceso dinámico, la rapidez con la que se pierde agua en forma de vapor dependerá de factores que tienen que ver con el medio de secado, que es la mezcla aire- vapor de agua y con el material que se seca, pero no con el instrumento de medición que se emplea. Sin embargo, los valores que pueden obtenerse con un instrumento de medición no son exactos y las desviaciones desde un valor real, cuando la propiedad que se mide cambia rápidamente con el tiempo, se debe a la respuesta que presente el instrumento, mientras más fiel y rápido sea, mejor respuesta dinámica presentará.

A continuación se presentan las gráficas de cinéticas de secado de cada experimento expresando el peso de la tortilla en función del tiempo de secado (figura 12 y 13).

En la figura 12 se presenta la cinética de secado del experimento usado como control (tortilla sin humectante). En ésta se distinguen 5 zonas cada una con una pendiente diferente.





**Figura 12.** Cinética de secado de la muestra control (tortilla sin humectante) (peso de la tortilla en función del tiempo).

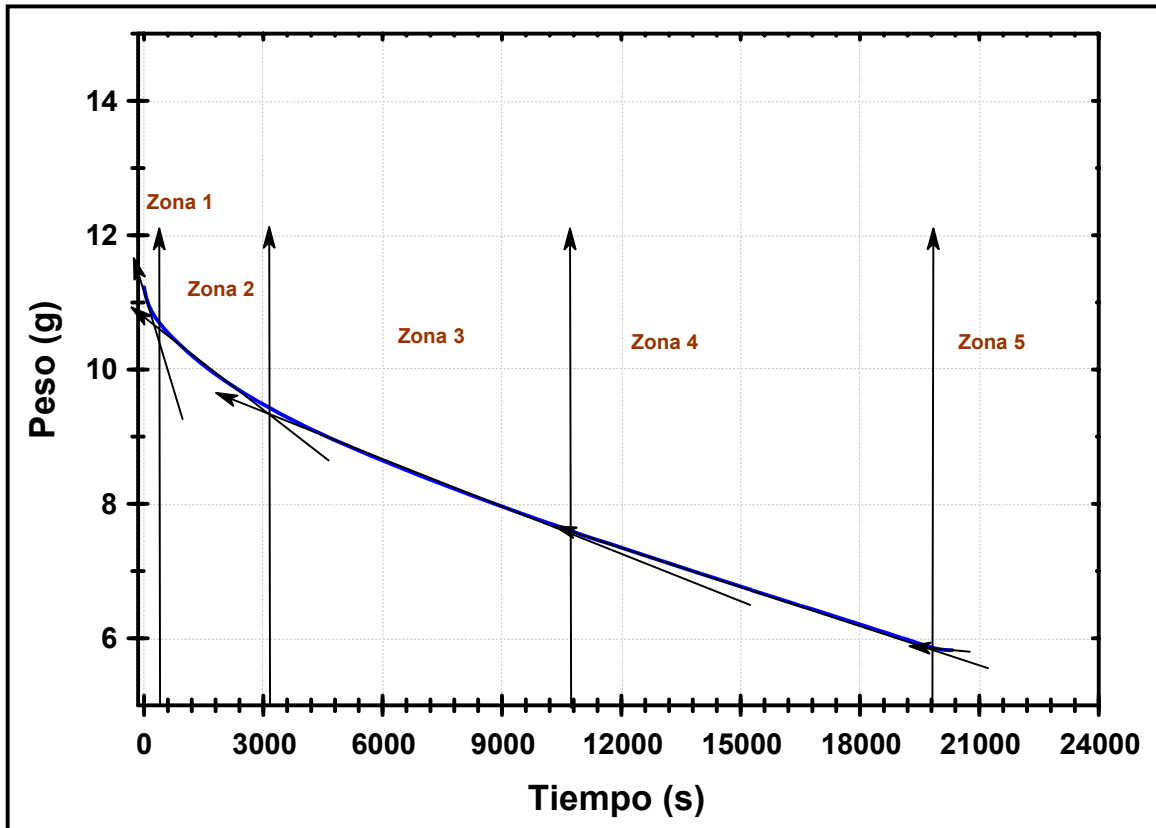


Figura 13. Cinética de secado del control (tortilla sin humectante) (división de la curva de acuerdo a sus pendientes).



En la figura 13 se muestra la misma curva que en la figura 12, pero dividida en 5 secciones, estas secciones se diferenciaron de acuerdo a la pendiente, las diferentes pendientes indican que la velocidad con la que se pierde el agua varía al transcurrir el tiempo. Recordemos que el agua en un alimento puede encontrarse como agua libre o como agua ligada, lo cual se determina por la interacción química o física con otros componentes, aunque no se ha establecido una clara división entre ambos términos (Badui, 1999; Fennema, 2000; Lewicki, 2003), la humedad libre se puede eliminar fácilmente por secado y está en función de las condiciones de humedad relativa y temperatura del aire que rodea el alimento y en la gráfica se puede ubicar en la primera mitad de la curva de secado. Algunos investigadores hacen referencia al término de agua *semiligada* que definen como un estado intermedio entre el agua ligada y el agua libre, en este caso las interacciones del agua con los demás componentes son débiles, pero suficientes para dificultar su eliminación por secado (Arámbula y col., 1999; 2000).

La presencia de un periodo de velocidad decreciente prolongado indica que prácticamente desde el inicio del proceso de secado, el agua no se está difundiendo hacia la superficie con la misma rapidez con la que se evapora desde la superficie de la tortilla, es decir, no se está formando una capa de agua sobre la superficie expuesta al secado, sin embargo, lo pronunciado de la pendiente en las primeras cuatro zonas indica que el agua se está evaporando con facilidad en un corto periodo de tiempo, mientras que en la última zona se puede apreciar una longitud de la curva corta y una pendiente menos pronunciada en comparación con las primeras zonas, demostrando que esta zona corresponde a la cantidad de agua ligada al alimento, ya que para ser evaporada por secado necesita una mayor energía o bien un periodo de tiempo prolongado, correspondiendo a una porción mínima de agua con respecto al contenido total de agua de la tortilla.



En la figura 14 se muestran las curvas de cinética de secado de las tortillas adicionadas con glicerol a las concentraciones de 0.5%, 1.0% y 1.5%, comparándolas con la curva de secado del control. Se observa un comportamiento similar en todas las curvas, donde también es apreciable un periodo de velocidad decreciente prolongado, que indica que el agua no se está difundiendo con la misma rapidez, por el contrario, a medida que se va eliminando el agua de la tortilla, los lapsos de tiempo requeridos para secar el alimento son más prolongados; de igual modo se observa en la gráfica con un óvalo la parte final de la curva (1.5 % de glicerol), una zona que no presenta ninguna otra concentración, esto es la prolongación casi horizontal justo antes de terminado el periodo de secado de la tortilla, lo que da a lugar a pensar que el humectante está logrando ligar agua en una mayor concentración, para apreciar con mayor facilidad el efecto que causó el glicerol en la tortilla se presentan las gráficas en las figuras 15, 16 y 17 donde se dibujan las líneas que indican las diferentes pendientes de la curva y las zonas de secado en las que es posible fragmentarla.

Al igual que en el caso del control en estas tortillas adicionadas con las tres diferentes concentraciones de glicerol, también se observan cinco zonas de diferente pendiente. En la zona 1, se aprecia una inclinación menos pronunciada de la curva, al igual que la evidente ampliación de la zona, lo cual sugiere que en peso se perdió aproximadamente la misma cantidad de agua con la diferencia de que los experimentos con glicerol requirieron más tiempo para que esto sucediera; en las zonas 2, 3 y 4, el aumento de la cantidad de agua semiligada en la tortilla es notorio, lo cual se originó por la adición del glicerol, ya que este compuesto interacciona con el agua presente en el alimento, que aunque en principio son

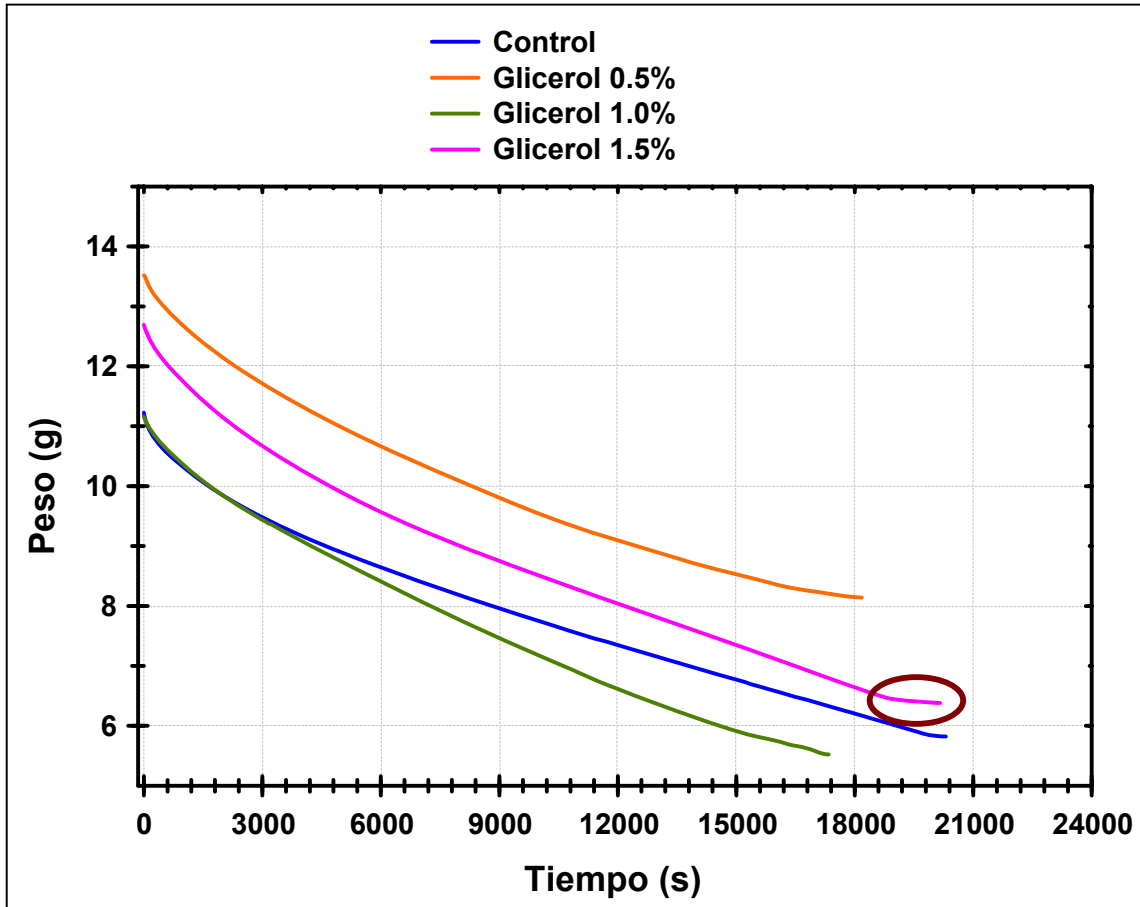


Figura 14. Comparación entre las curvas de cinética de secado de las tortillas adicionadas con glicerol en las tres diferentes concentraciones y el control.

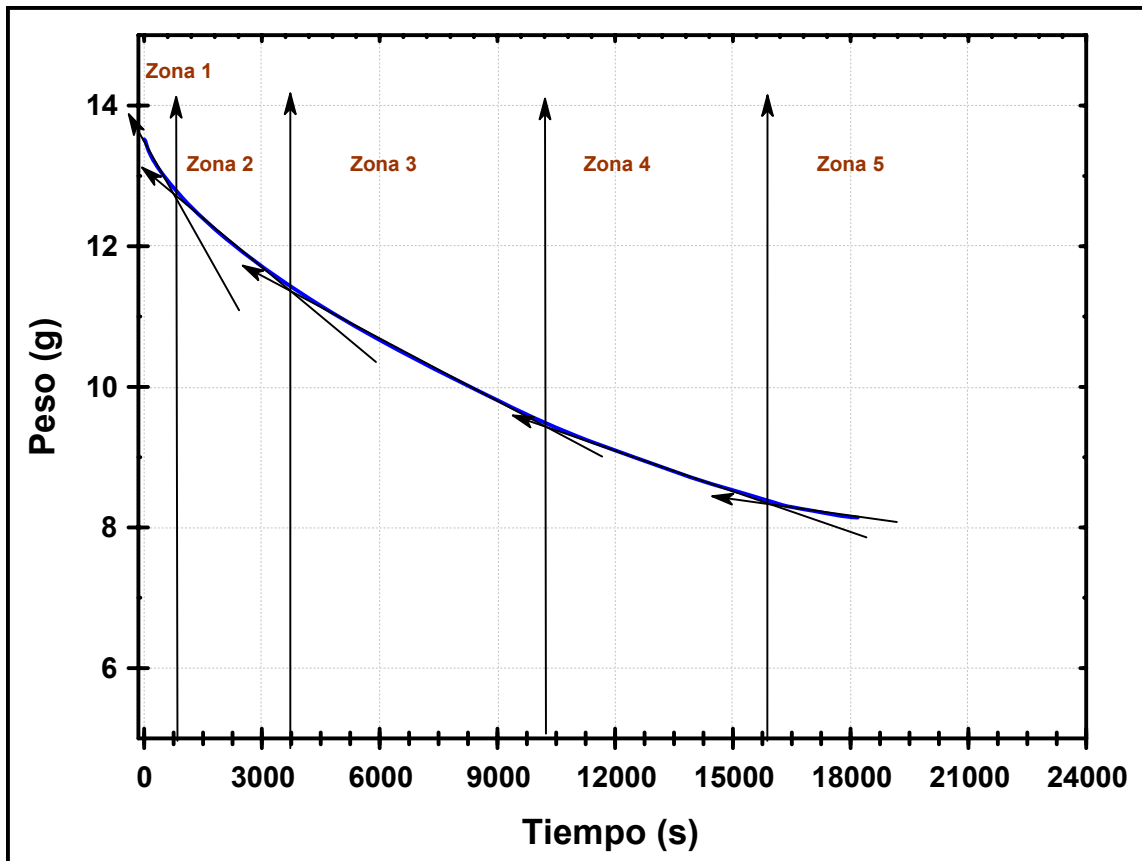


Figura 15. Gráfica de cinética de secado de la tortilla adicionada con glicerol al 0.5% (división de la curva de acuerdo a las pendientes)

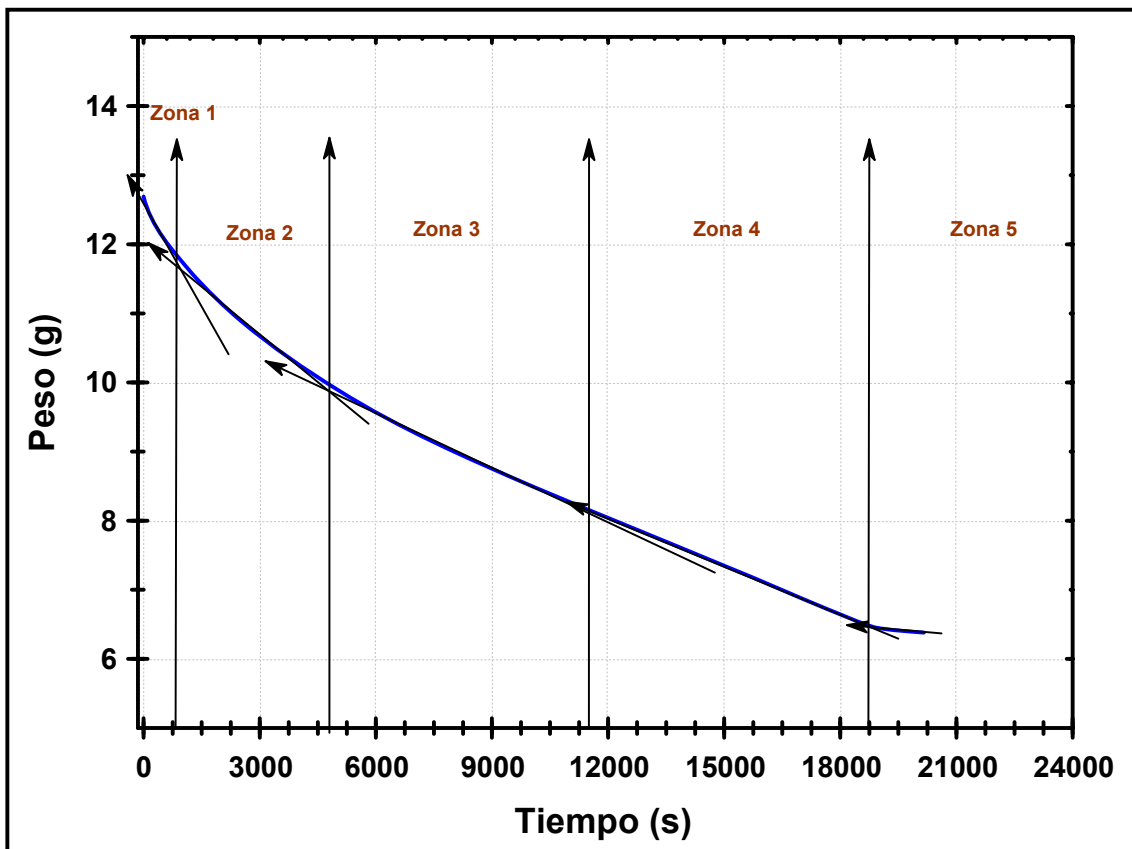
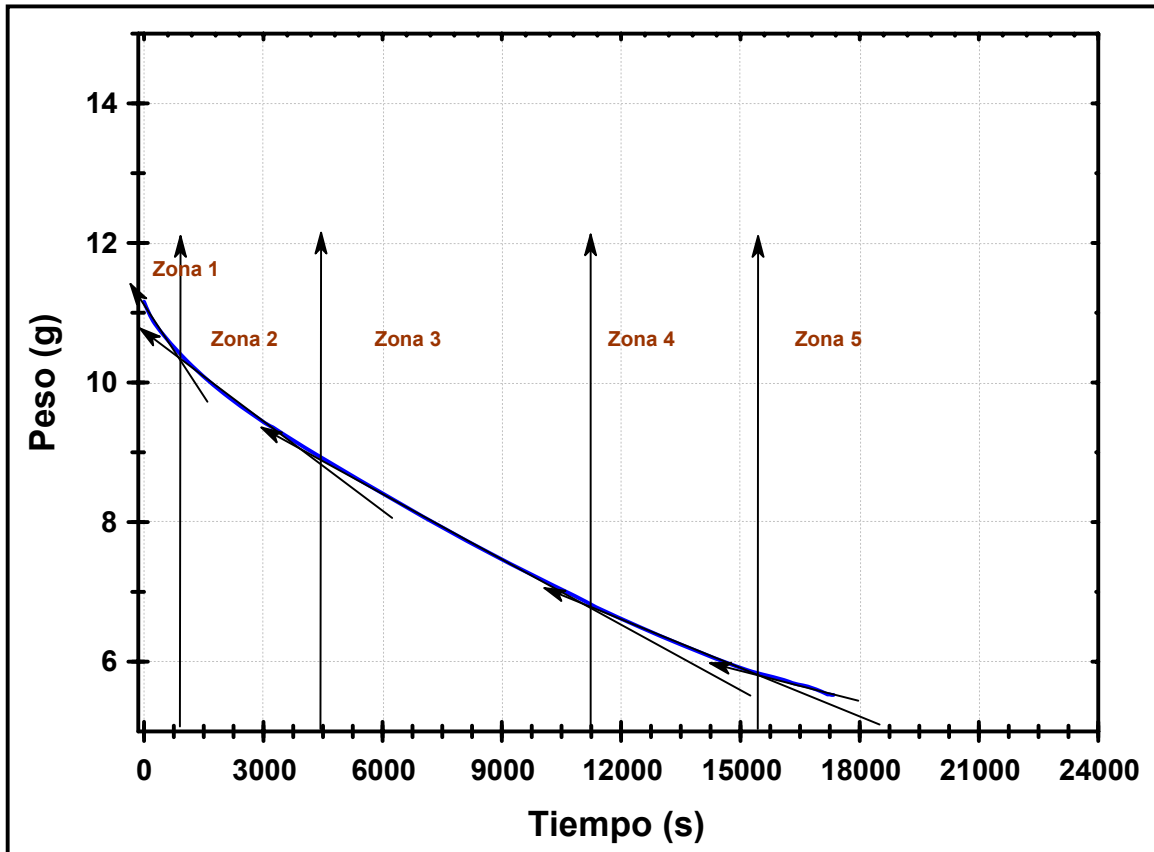


Figura 16. Gráfica de cinética de secado de la tortilla adicionada con glicerol al 1.0% (división de la curva de acuerdo a las pendientes)



**Figura 17.** Gráfica de cinética de secado de la tortilla adicionada con glicerol al 1.5% (división de la curva de acuerdo a las pendientes)





enlaces débiles, la cantidad de estas uniones que fueron formadas, es lo que genera que se retenga la humedad, mostrando una mayor dificultad para que el agua sea evaporada por secado, y por tanto necesitar más tiempo de exposición a esta temperatura, o bien aplicar una mayor energía (aumentar la temperatura). Finalmente en la zona cinco se observa una prolongación de la curva, correspondiente al agua ligada. Este tipo de agua es la porción de agua presente en menor proporción en el grupo control (zona 5, figura 13), la cual es la que presenta la mayor resistencia al secado con respecto al agua libre y semiligada. Sin embargo, como se mencionó anteriormente en las tortillas elaboradas con el glicerol, la amplitud de esta zona aumentó, lo cual es un indicio de que la cantidad de agua ligada en estas tortillas aumentó.

Un fenómeno similar se aprecia en las cinéticas de secado correspondientes a las tortillas con manitol al 0.5% y 1.0% (figura 18). Primero se observa un periodo de velocidad decreciente prolongado y una pendiente pronunciada que disminuye al transcurrir el tiempo, provocando así un alargamiento del periodo de secado de la tortilla, lo cual indica que el agua no se está difundiendo con la misma rapidez y que el manitol está logrando retener la humedad de la tortilla con mayor efectividad.

El agua eliminada en la última zona corresponde al agua ligada que se encuentra en el alimento, en el caso específico de las concentraciones de 0.5 y 1.0% de manitol, esta parte de las curvas (marcada con un óvalo color negro dentro de la figura 18) muestra una prolongación notoria a simple vista, en comparación con el control y es apreciable la resistencia que opone el agua a ser eliminada por secado, ya que los periodos de tiempo aumentan mientras que las cantidades de agua eliminada cada vez son menores, lo cual puede apreciarse con el escalonamiento menos pronunciado de las curvas (pendientes).

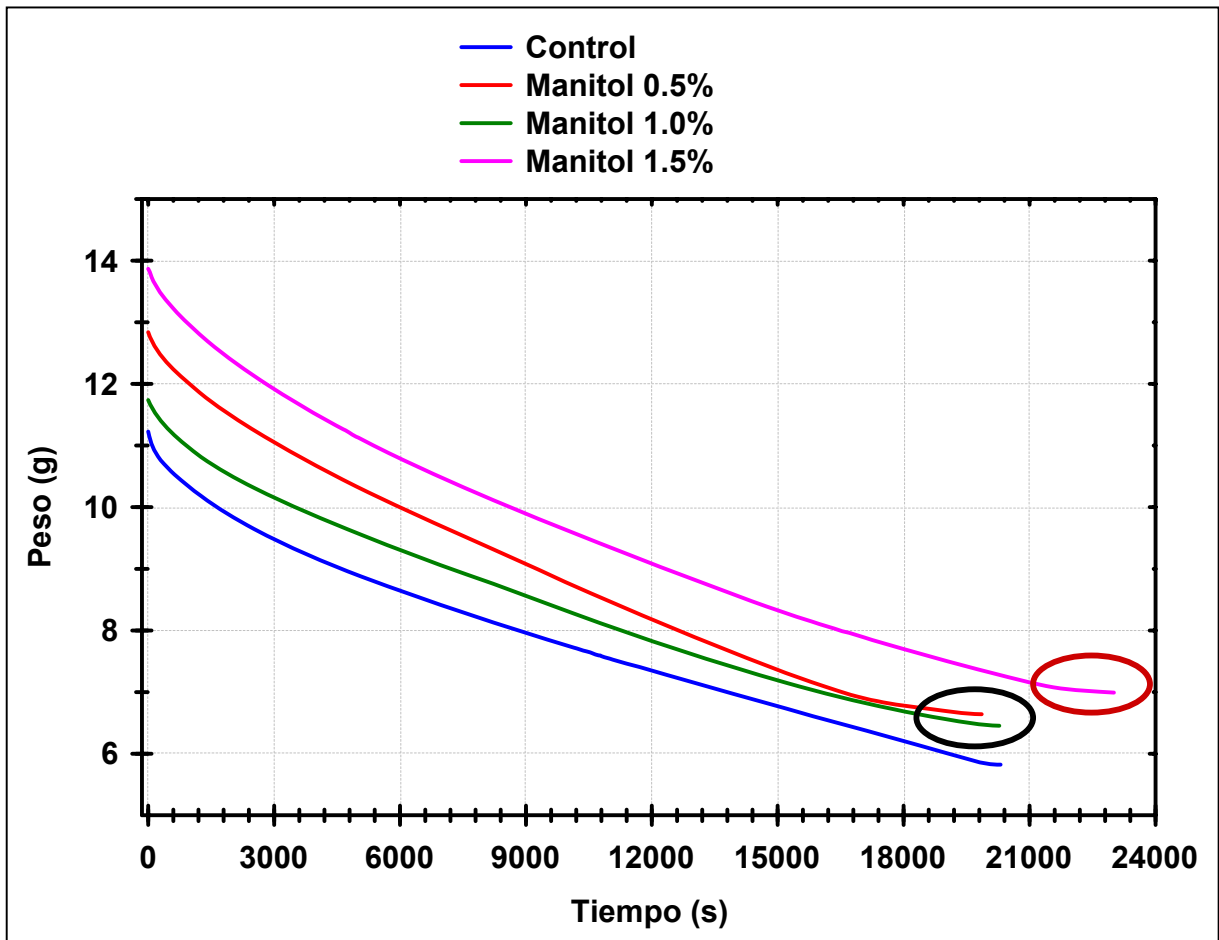


Figura 18. Comparación entre las curvas de cinética de secado de las tortillas adicionadas con las tres diferentes concentraciones de manitol y el control.



En Cuanto a la curva trazada con los datos obtenidos del secado de la tortilla adicionada con manitol al 1.5% (figura 21), de igual modo se aprecia en la parte final de la curva una elongación mayor (marcada dentro de la gráfica con un óvalo color rojo), con un comportamiento casi horizontal, lo cual indica el aumento de la cantidad de agua que se ligó a la tortilla, efecto logrado con la adición del manitol al 1.5% y que ofreció mejores resultados en comparación con el glicerol a la misma concentración.

A continuación se presentan las gráficas de las tortillas adicionadas con manitol a las tres diferentes concentraciones discutidas anteriormente, pero ahora se muestran segmentadas en zonas trazadas de acuerdo a las diferentes pendientes que presentan las curvas de secado (figuras 18), de la misma manera que se hizo con las gráficas del glicerol.

Las figuras 19 y 20 muestran un comportamiento similar, las curvas se dividen en cinco zonas de acuerdo a las pendientes que muestra al transcurrir el tiempo, la zona 1 es prolongada y con una pendiente igualmente pronunciada, (fenómeno que se presentó también en la gráfica del control y en las tortilla con glicerol), de igual modo, es importante destacar que la longitud de las zonas intermedias 3 y 4 aumentan su longitud en comparación con los experimentos anteriores, lo cual sugiere un incremento de tiempo para que la tortilla sea deshidratada completamente, es decir, logra retener el agua de la tortilla por un periodo de tiempo mayor.

Se presentan de forma separada la gráfica de la tortilla adicionada con manitol al 1.5%, ya que para efectos de estudio y discusión será más fácil destacar las características de la curva en relación a todos los experimentos discutidos anteriormente.

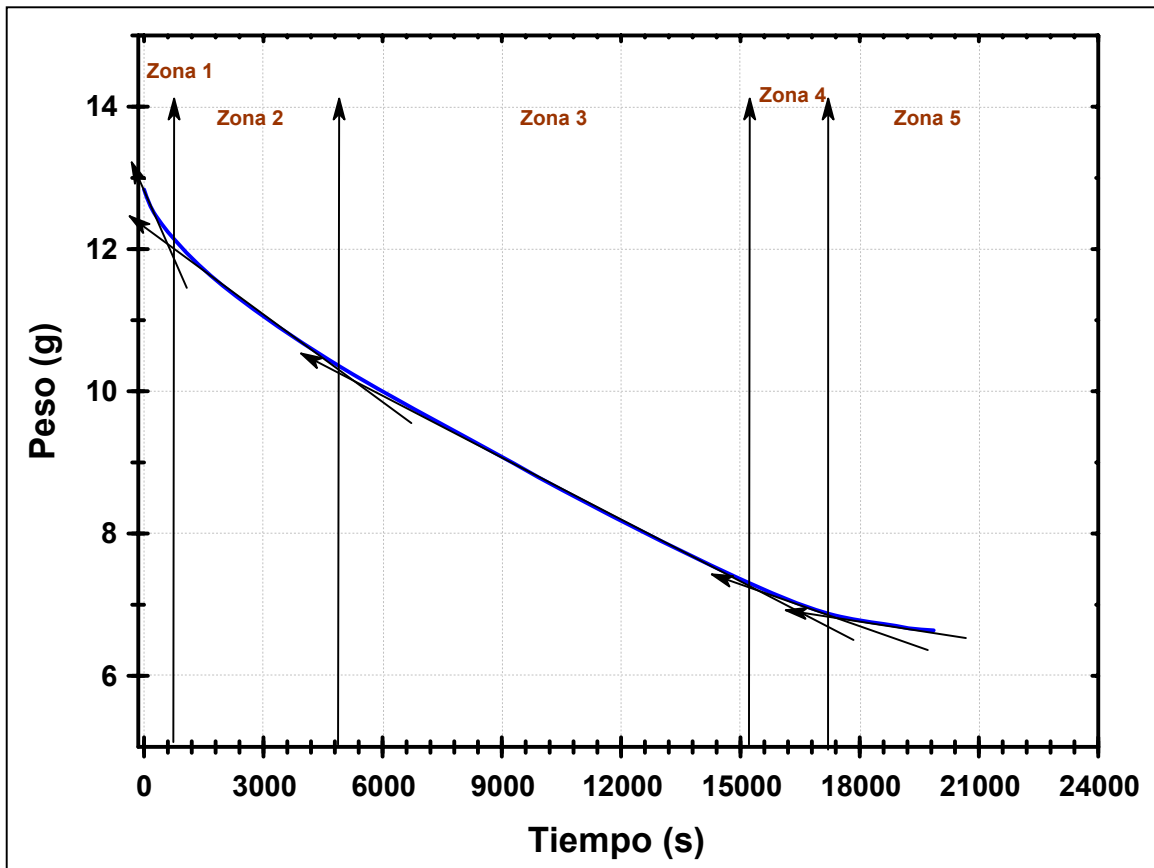
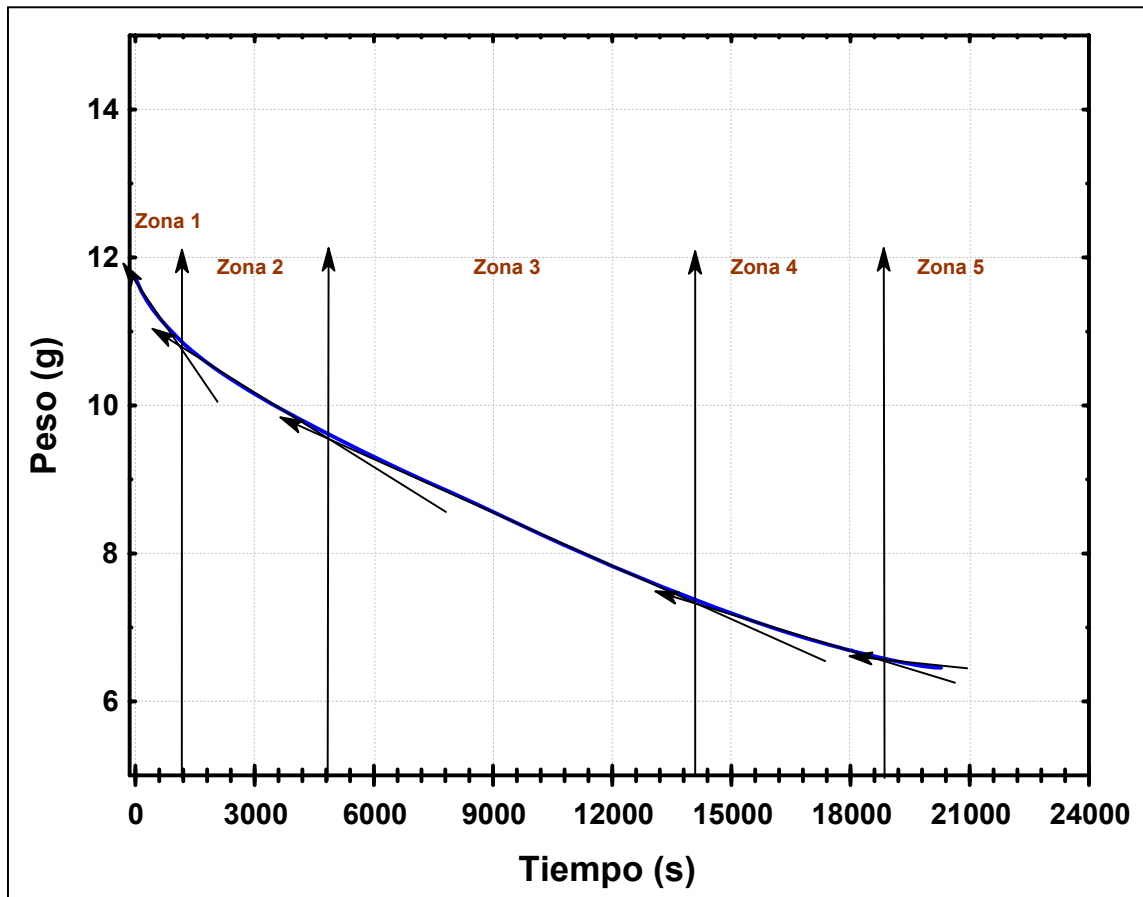


Figura 19. Gráfica de cinética de secado de la tortilla adicionada con manitol al 0.5% (división de la curva de acuerdo a las pendientes)



**Figura 20.** Gráfica de cinética de secado de la tortilla adicionada con manitol al 1.0% (división de la curva de acuerdo a las pendientes)

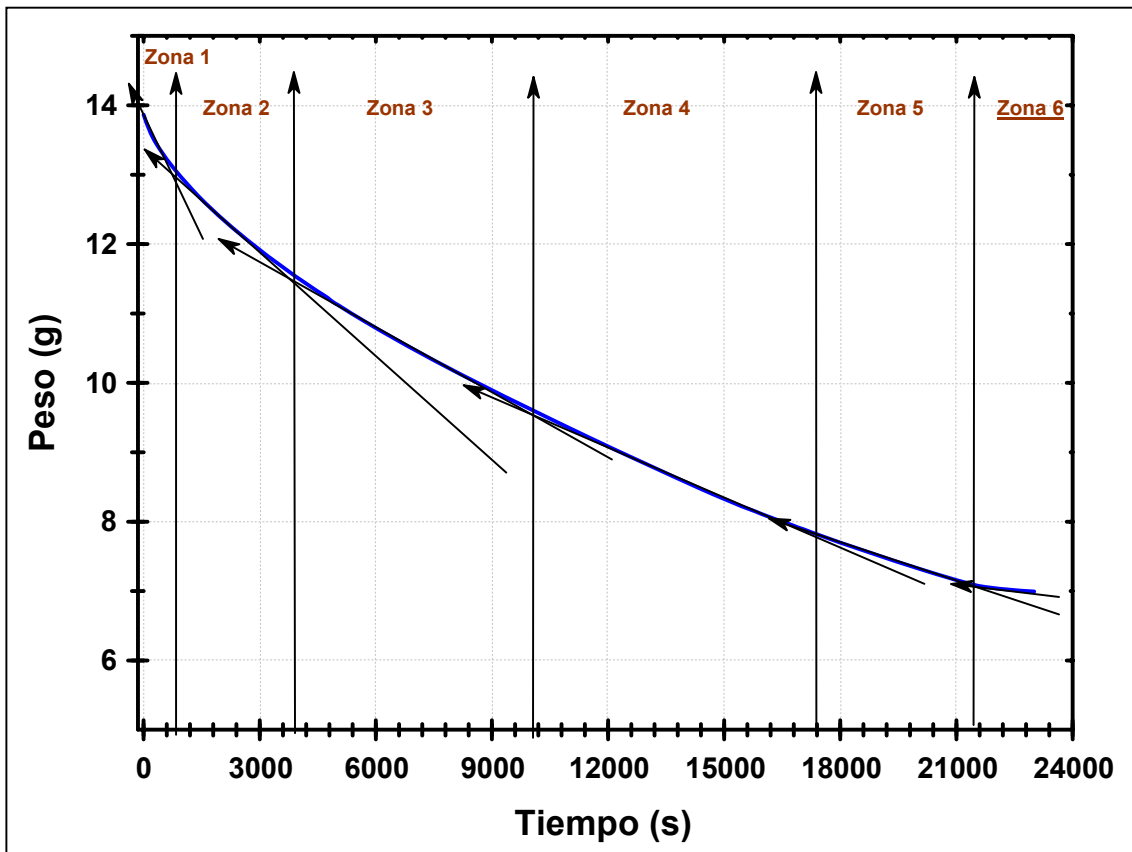


La figura 21 corresponde a la tortilla adicionada con manitol al 1.5%, además de ser visiblemente más amplia, se dividió en seis zonas de acuerdo a las pendientes de la curva, la prolongación del tiempo de secado referido en el eje de las abscisas fue mucho mayor, es decir, se retuvo la humedad de la tortilla por más tiempo, lo cual se explica con el aumento en la cantidad de las interacciones agua-humectante, es decir, hubo una mayor formación de puentes de hidrógeno que son un tipo especial de atracción intermolecular que existe entre los átomos de hidrógeno de los enlaces polares (OH) y un par de electrones no compartido de los átomos de oxígeno del agua que se encuentra en la tortilla. Finalmente el aumento de la cantidad de agua ligada al alimento, fenómeno que no se presentó de la misma forma en ninguno de los experimentos realizados a lo largo de la investigación.

La explicación de por qué con el glicerol no se observó el fenómeno de retención de agua con la misma intensidad radica principalmente en la naturaleza del humectante, ya que recordando las estructuras químicas de ambos humectantes, en el caso del glicerol únicamente se cuenta con tres pares de radicales OH, mientras que en la estructura del manitol se encuentran seis radicales OH, el doble que en glicerol, lo cual permite que se formen una mayor cantidad de puentes de hidrógeno con el agua existente en la tortilla y aunque en general los puentes o enlaces de hidrógeno son de baja energía el efecto que originan es suficiente para retener el agua un periodo mayor de tiempo, retardando el proceso de deshidratación.

## 6.2. Coeficiente efectivo de difusión de agua ( $D_{efw}$ ).

Para el cálculo de los  $D_{efw}$ , las gráficas de E fueron segmentadas en las mismas zonas en las que se dividieron las curvas de cinéticas de



**Figura 21.** Gráfica de cinética de secado de la tortilla adicionada con manitol al 1.5% (división de la curva de acuerdo a las pendientes)



secado, respetando los mismos intervalos de tiempo para no incurrir en errores y observar si hubo o no diferencia significativa entre los resultados. En el cuadro 5 se presentan los valores de los  $D_{efw}$  calculados con los valores de cada una de las pendientes.

Se realizó un análisis de varianza entre los diferentes valores de coeficientes de difusión de agua correspondiente a cada una de las zonas de las curvas de E, para saber si estadísticamente existía o no diferencia significativa entre ellas, a continuación se presentan los resultados obtenidos (cuadro 5).

El fenómeno de difusión de agua en una tortilla se utilizó como referencia para esta prueba, a condiciones temperatura y humedad relativa ambiente, con un área de transferencia de masa similar y con la adición de humectantes a tres diferentes concentraciones, la velocidad con la que se pierde agua por evaporación en cada experimento debe ser diferente, la respuesta en teoría debe respaldar los resultados de las velocidades de secado, es decir, al igual que se observó una variación en las velocidades de secado de las tortillas, debe existir una diferencia significativa entre los resultados de los coeficientes de difusión de agua calculados para cada una de las zonas de la curva; sin embargo no es así.

Se realizaron tres repeticiones, las condiciones de secado para cada muestra fueron las mismas, se realizó una ANOVA con un nivel significación de  $\alpha = 0.05$ , las hipótesis estadísticas fueron:  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$  y  $H_A$ : al menos una  $\mu$  es diferente;  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$  y  $\mu_6$  representan las medias de los valores de  $D_{efw}$  en cada zona de la curva. Como se puede observar en el cuadro 6, la variación entre las medias es mínima, por lo tanto, ninguno de los valores de F calculados son superiores a los valores F de tablas, por lo que no hubo evidencia estadística suficiente para rechazar la  $H_0$ , con un nivel de confianza del 95%.





**Cuadro 5.** Valores de  $D_{efw}$ , calculados a partir de las diferentes pendientes de cada curva de E y del espesor de la tortilla analizada (L).

FORMULACION	Exp.	Defw1 <sup>1</sup>	Defw2	Defw3	Defw4	Defw5	Defw6
<b>CONTROL</b>	C	4.8507E-11	8.2368E-13	6.6836E-13	1.2883E-12	1.3934E-11	0
	C	5.9259E-11	4.1064E-13	2.1589E-13	7.6095E-13	2.6603E-11	0
	C	1.0287E-10	6.843E-13	1.0179E-13	2.398E-13	0	0
<b>GLICEROL 0.5%</b>	1G	2.4582E-11	3.3607E-13	1.8734E-13	5.4367E-13	1.5105E-11	0
	1G	5.0895E-11	4.5374E-13	2.7873E-13	6.7933E-12	0	0
	1G	3.7697E-11	3.1086E-13	9.2128E-13	2.557E-11	0	0
<b>GLICEROL 1.0%</b>	2G	6.4817E-11	4.225E-13	9.5794E-14	3.5754E-12	0	0
	2G	5.4379E-11	1.5271E-13	1.4242E-12	1.2317E-09	0	0
	2G	4.7117E-11	2.7544E-13	1.1519E-13	3.5435E-13	4.3877E-11	0
<b>GLICEROL 1.5%</b>	3G	4.3187E-11	2.1933E-12	1.3899E-11	6.3132E-13	2.5855E-11	0
	3G	2.0562E-11	3.1865E-13	2.5287E-13	3.6852E-12	0	0
	3G	3.8073E-11	2.6323E-13	1.2803E-13	9.2743E-13	3.6017E-10	0
<b>MANITOL 0.5%</b>	1M	5.4915E-11	1.9702E-13	2.0128E-13	1.5893E-12	5.3971E-11	0
	1M	3.9103E-11	2.1315E-13	1.3563E-13	1.3098E-12	4.1188E-11	0
	1M	4.1317E-11	2.6415E-13	1.1809E-13	4.2272E-12	1.7466E-09	0
<b>MANITOL 1.0%</b>	2M	3.0236E-11	2.0872E-13	1.0503E-13	6.4378E-13	2.9458E-11	0
	2M	4.7811E-11	1.9799E-13	1.1668E-13	1.2356E-12	2.3161E-10	0
	2M	6.5588E-11	4.9305E-13	1.1364E-13	5.1903E-13	1.0268E-11	1.3996E-10
<b>MANITOL 1.5%</b>	3M	4.2709E-11	1.9883E-13	7.7126E-14	1.2329E-13	1.5235E-11	1.0615E-08
	3M	5.4937E-11	1.7766E-13	9.7265E-14	1.4556E-13	1.0621E-12	0
	3M	5.2255E-11	7.3734E-13	2.3936E-12	4.2485E-11	1.3491E-11	0

<sup>1</sup> El número ubicado en el costado derecho corresponde a cada una de las zonas para el que fue calculado el  $D_{efw}$ .

**Cuadro 6.** Resultado del ANOVA realizado a los valores de  $D_{efw}$ 

Zonas de la curva	Efecto	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F	P
Zona 1	Intercepto	4.962E-20	1	4.962E-20	210.6472	7.87E-10
	Zona 1	2.585E-21	6	4.308E-22	1.8287	0.165019
	Error	3.298E-21	14	2.356E-22		
Zona 2	Intercepto	4.148E-24	1	4.148E-24	20.66309	0.000457
	Zona 2	1.126E-24	6	1.877E-25	0.93518	0.500326
	Error	2.81E-24	14	2.007E-25		
Zona 3	Intercepto	2.231E-23	1	2.231E-23	2.393783	0.144121
	Zona 3	4.982E-23	6	8.303E-24	0.890776	0.527342
	Error	1.305E-22	14	9.322E-24		
Zona 4	Intercepto	8.403E-20	1	8.403E-20	1.165013	0.298673
	Zona 4	4.259E-19	6	7.099E-20	0.984209	0.471749
	Error	1.01E-18	14	7.213E-20		
Zona 5	Intercepto	3.29E-19	1	3.29E-19	2.260779	0.154908
	Zona 3	8.775E-19	6	1.462E-19	1.005021	0.460025
	Error	2.037E-18	14	1.455E-19		
zona 6	Intercepto	5.508E-18	1	5.508E-18	1.026367	0.328203
	Zona 5	3.206E-17	6	5.343E-18	0.995605	0.465299
	Error	7.513E-17	14	5.366E-18		



Por lo anterior se puede decir que ninguno de los humectantes adicionados a las tortillas tuvo un efecto significativo con respecto al control sobre los coeficientes de difusión efectiva del agua en las condiciones probadas.

La variación de la composición química de la masa con la que se elaboraron las tortillas provocada con la adición de los humectantes no es suficiente para alterar la estructura tridimensional a nivel macromolecular de la misma, esto podría explicar porque no se observaron diferencias significativas en los coeficientes de difusión de agua, recordemos que el mecanismo de transporte de agua, está principalmente en función de la estructura del material sólido, de las variaciones que éste presente a nivel macromolecular, es decir, el aumento o disminución del tamaño del poro a través del cual puede difundirse el agua y de las condiciones del medio que le rodea.

La adición de los humectantes favorece la retención del agua, ya que genera interacciones agua-humectante por medio de enlaces de hidrógeno, como ya se explicó en los resultados de las cinéticas de secado, pero no hay una alteración en relación con los otros componentes de la masa ni mucho menos con su estructura macromolecular original.

### **6.3. Efecto de los humectantes en la rolabilidad.**

En el cuadro 7 se muestran los resultados de cada una de las formulaciones realizadas, el tiempo transcurrido después de elaborada la tortilla en el cual se realizó la prueba de rolabilidad y el valor de la escala subjetiva que le fue asignado de acuerdo al grado de rompimiento que presentó.

Se puede decir que la adición de los humectantes si mejoró la retención de agua de las tortillas de acuerdo a los resultados obtenidos en la rolabilidad de las



tortillas (fractura de la corteza) (Rooney y Bedolla, 1984). Analizando en primer lugar el control, en el cuadro 7 se observa que el tiempo necesario para que sea notorio el daño en la tortilla fue a partir de los 90 min después de elaborada, observándose una pérdida de agua crítica entre los 90 y 120 min, donde el nivel de daño estuvo entre el 75 y 100 %, opuesto a lo que sucedió con todas las demás formulaciones, en las cuales no se observó un daño similar aún después de 150 min de elaboradas. En la figura 22 se muestran las fotografías del grupo control y de los tratamientos con glicerol y manitol al 0.5 % después de 120 min de elaboradas, en dónde ya es notoria la mejoría de la textura.

En cuanto a los dos humectantes, se observó que el mejor resultado se obtuvo con la formulación del manitol al 1.5 %, ya que aún después de transcurridos 120 minutos, la tortilla presenta un 0% de fractura o daño en su corteza. Efecto que no fue observado con el glicerol, ya que con el uso de este a la mayor concentración empleada (1.5%), las tortillas desde los primeros 30 min transcurridos, ya presenta daño del 1 al 25 %, mostrando fracturas del 51 al 75% a los 120 min, es importante destacar de igual manera que el manitol a esta misma concentración presento mínimas fracturas (1 al 25%) hasta los 150 min transcurridos después de la elaboración de la tortilla (figura 23).

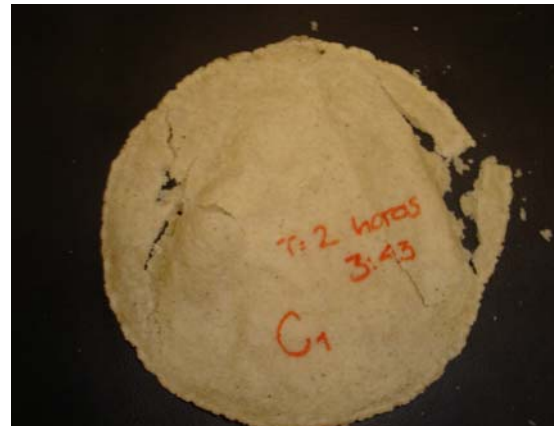


**Cuadro 7.** Valores asignados a cada tortilla dentro de la escala subjetiva de rolabilidad.

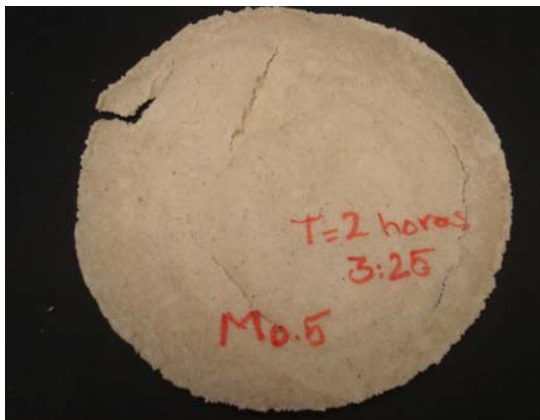
FORMULACIÓN	TIEMPO (min.)	VAL. ASIGNADO	FORMULACIÓN	TIEMPO (min.)	VAL. ASIGNADO
CONTROL	30	1	MANITOL 0.5%	30	2
	60	1		60	2
	90	2		90	2
	120	5		120	3
GLICEROL 0.5%	30	2	MANITOL 1.0%	150	5
	60	2		30	1
	90	3		60	1
	120	3		90	2
GLICEROL 1.0%	30	2	MANITOL 1.5%	120	4
	60	2		150	4
	90	2		30	1
	120	3		60	1
GLICEROL 1.5%	30	2		90	1
	60	2		120	1
	90	2		150	2
	120	3			
	150	4			



a) Control 90 min  
(5400 s)



b) Control 120 min  
(7200 s)

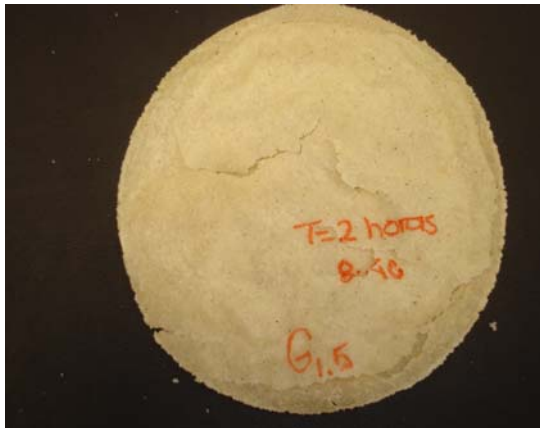


c) Manitol 0.5%, 120 min  
(7200 s)



d) Glicerol 0.5%, 120 min  
(7200 s)

**Figura 22.** Fotografías de las comparaciones del control con las tortillas adicionadas con los dos humectante a la mínima concentración (0.5%) (entre paréntesis se presenta el tiempo expresado en segundos).



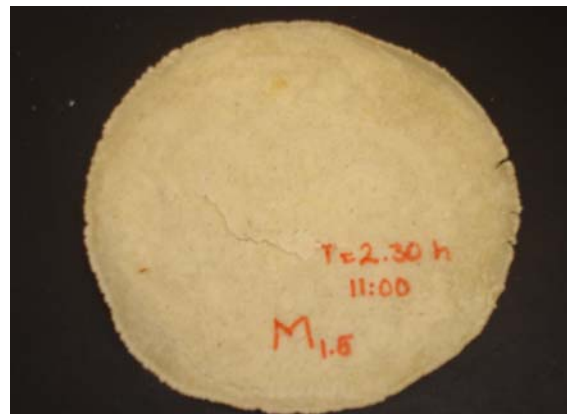
a) Glicerol 1.5%, 120 min (7200 s)



b) Glicerol 1.5%, 150 min (9000 s)



c) Manitol 1.5%, 120 min (9000 s)



d) Manitol 1.5%, 150 min (9000 s)

**Figura 23.** Fotografías de las comparaciones del control con las tortillas adicionadas con glicerol y manitol a la concentración de 1.5% (entre paréntesis se presenta el tiempo expresado en segundos).



# Conclusiones





## *Capítulo VII*

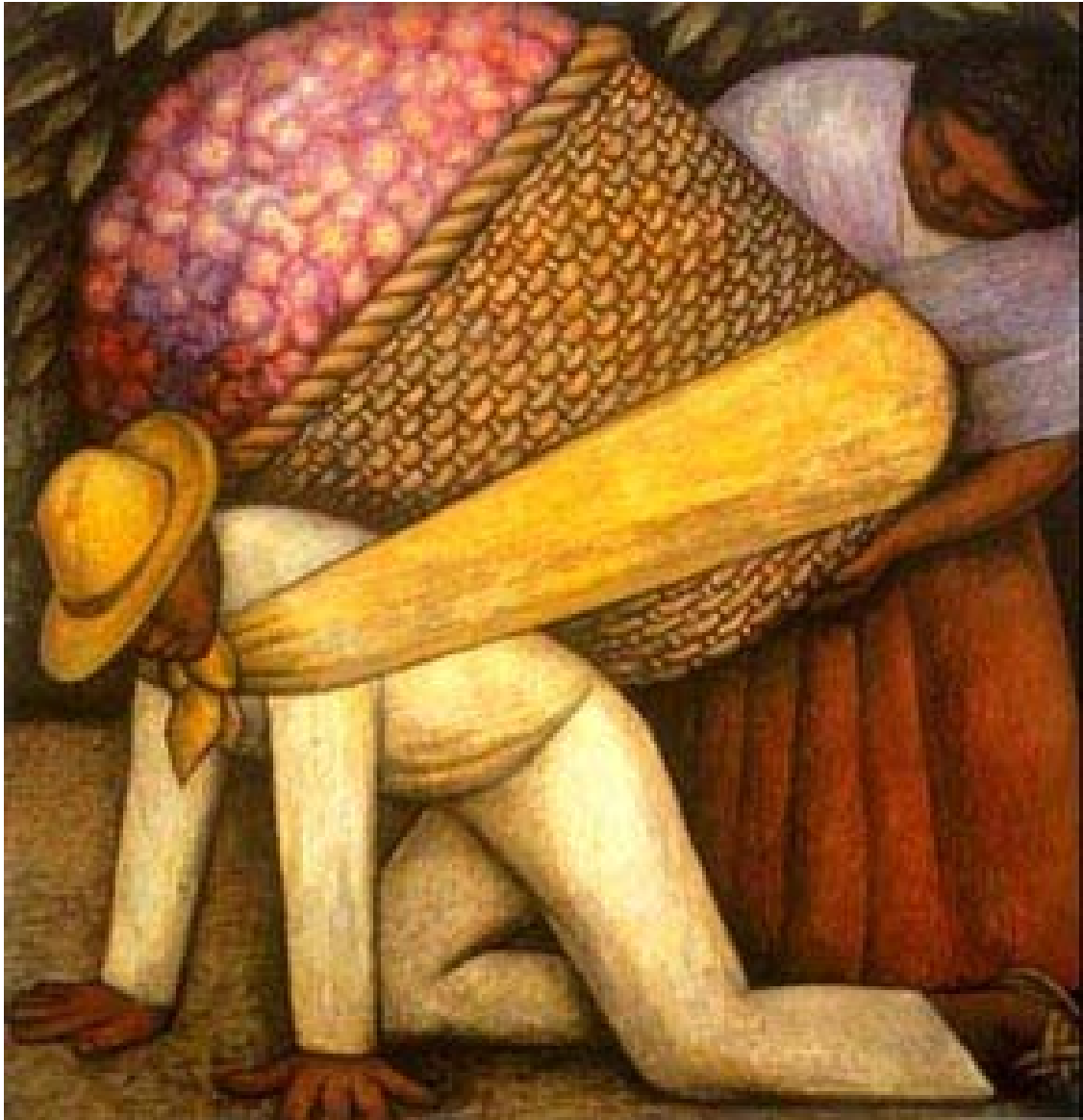
### *CONCLUSIONES*

Los humectantes que fueron adicionados a las tortillas favorecen la retención de agua aun y cuando se adicionen a una concentración de 0.5% con respecto al peso de la HMN, presentando un efecto favorable en la roabilidad y el grado de daño ocasionado a la corteza de la misma.

La formulación de manitol al 1.5% con relación al peso de la HMN, retrasa la deshidratación y la inalterabilidad de la textura de la tortilla por 120 minutos mostrando un daño mínimo a los 150 minutos de tiempo después de elaborada.

Tanto el glicerol como el manitol retrasan el proceso de deshidratación de las tortillas, ya que son carbohidratos de bajo peso molecular (polialcoholes ) y generan enlaces de hidrógeno entre el humectante y el agua presente en el alimento, que aunque de baja energía son suficientes para retrasar su evaporación y prolongar el tiempo de secado, sin embargo, al tener el doble de la cantidad de iones OH el manitol en su estructura molecular en comparación con el glicerol, éste ofrece mejores resultados.

Aparentemente la adición de humectantes en las diferentes concentraciones solo modifica la composición química de la masa pero no altera la estructura tridimensional a nivel macromolecular de la misma, por lo tanto no existe diferencia significativa en el coeficiente efectivo de difusión del agua.



# Referencias bibliográficas



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Arámbula**, Villa. G., Sánchez, M. R.A., Figueroa-Cárdenas, J.D., González-Hernández, J. y Ordorica-F., C. (1999). Corn Masa and Tortillas from Extruded Instant Corn Flour Containing Hydrocolloids and Lime. *Journal of Food Science*. 64: 120-124.

**Arámbula** – Villa, G.; Yañez-Limón, J. M., Vorovier-Vasilievich, Y., González-Hernández, J. (2000). Coeficiente efectivo de difusión de agua en masas de maíz nixtamalizado por extrusión. *Agrociencia*, 34(6): 717-727.

**Arreola**, J. (1998). Estabilizadores emulsivos en la elaboración de tortillas. *Industria Alimenticia*, 9(8):52-58

**Asturias**, M.A., (1975). Hombres de maíz. Editorial Universitaria Centroamericana, EDUCA, Guatemala.

**Badui**, D., S. (1999) Química de los alimentos. 3a ed. Editorial Longman. México.

**Bedolla** S. & Rooney LW. (1984). Characteristics of U.S. and Mexican instant maize flours tortilla and snack preparation. *Cereal Foods World* 1984; 29(11):732-735.

**Bello**, - Pérez, L. A.; Osorio-Díaz, P., Agama-Acevedo, E., Núñez-Santiago, C., Paredes-López, O., (2002). Propiedades químicas, fisicoquímicas y reológicas de masa y harinas de maíz nixtamalizado. *Agrociencia*, 36(3):319-328.

**Boudhrioua**, N.; Bonsái, C.; Daudin, J. D. (2003). Estimation of moisture diffusivity in gelatin-starch gels using time-dependent concentration-distance curves at constant temperature. *Food Chemistry*. In Press.

**Brennan**, J. G.; (1980). Las operaciones de la ingeniería de los alimentos. 2ª ed. Editorial Acribia. Zaragoza.

**Casp**, V. A., Abril, R. J., (1999). Procesos de conservación de los alimentos. Ediciones Mundi – Prensa, Madrid, España.

**FAO**. (1993). El maíz en la nutrición humana. Editorial FAO. Roma.

**Fennema**, R. O. (2000). Química de los alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza.



**Fernández, M., J. L.** (2003). Caracterización fisicoquímica de biopolímeros derivados del maíz sometidos a tratamientos térmico-alcalinos. Tesis doctoral-IPN, Querétaro, México.

**Flores-Farías R, Martínez-Bustos F, Salinas-Moreno Y, Kil-Chang Y, González-Hernández J & Ríos E.** Physicochemical and rheological characteristics of commercial nixtamalised mexican maize flours for tortilla. *J Sci Food Agric.* 2000; 80:657-664.

**Gekas, V.** (2000). Transport Phenomena of Foods and Biological Materials. Editorial CRC Press. Florida.

**Geankoplis, C.J.** (1982). Procesos de transporte y operaciones unitarias. Editorial Continental. México.

**Gómez M.H., Rooney L.W. y Waniska R.D.,** (1991). Starch Characterization of Nixtamalized Corn Flour. *Cereal Chem.* 68(6): 578-582.

**Gómez M.H., Rooney L.W. y Waniska R.D.,** (1987). Dry Corn Masa Flours for Tortilla and Snack Food Production. *Cereal Foods World.* 32 (5): 372-377.

**González A., U.** (1995). El maíz y su conservación. Editorial Trillas. México.

**Hoseney, R. C.** (1991). Principios de ciencia y tecnología de los cereales. Editorial Acribia. Zaragoza.

**Hui, Y. H.** (1991). Encyclopedia of Food Science and Technology. Vol. 1. Editorial John Wiley. N. Y.

**INEGI,** Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Abasto y comercialización de productos básicos. 2000. INEGI, México.

**Karel, M.** (1975). Dehydration of Foods. En "Principles of Food Science. Part II. Physical Principles of Food Preservation". Fennema, R. O. Editorial Dekker. N.Y.

**Khan, M. N., Desrosiers MC, Rooney LW, Morgan RC & Sweat VE.** Corn tortillas: evaluations of cooking procedures. *Cereal Chem.* 1982; 59(9): 274-284.



- Kemp**, I. C.; Fyhr, C. B., Laurent, S., Roques, M. A., Groenewold, C. E., Tsotsas, E., Sereno, A. A., Bonazzi, C. B., Bimbenet, J-J. and Kind, M., (2001). Methods of Processing Experimental Drying Kinetics Data. *Drying Technology*, 19 (1): 15-34.
- Lewicki**, P. P. (1997). The applicability of de GAB model to food water sorption isotherms. *International Journal of Food Science and Technology*, **32**:553-557.
- Lewicki**, 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.
- MNCP**. (1987). Museo Nacional de Culturas Populares. El Maíz, Fundamento de la Cultura Popular Mexicana. García Valadez (Ed). Dirección General de Culturas Populares SEP, México. Pp: 114.
- Menon**, A. S.; Mujumdar, A. S. (1987). Drying of Solids: Principles, Classification, and Selection of Dryers. En "Handbook of industrial Drying".
- Mujumdar**, A. S. Editorial Marcel Dekker. N. Y.
- Muthukumarappan**, K.; Gunasekaran, S. (2001). Modelling Moisture Diffusion in Food Grains Durin Absorption. En "Food Processing Operations Modelling. Design and Analysis". **Irudayaraj**, J. Editorial Marcel Dekker. N.Y.
- NOM**, Norma oficial mexicana NOM F-46-S-1980.
- NOM**, Norma oficial Mexicana, NOM 147-SSA1-1996.
- Ocon** G., J.; Tojo B., G. (1972). Problemas de ingeniería química: Operaciones básicas. Editorial Aguilar. Madrid.
- Pinazo** O., J. M. (1995). Manual de Climatización. Tomo I: Transformaciones psicrométricas. Editorial UPV. Valencia.
- Palacios-Fonseca**, Alin, 2004. Tesis de Licenciatura.
- Primo** Y., E. (1998). Química de los alimentos. Editorial Síntesis. Madrid.
- Popol Vuh**, (1975). Las antiguas historias del Quiche. Editorial Universitaria Centro Americana, EDUCA, Guatemala.



- Reyes C., P.** (1990). El maíz y su cultivo. Editorial AGT Editores. México.
- Rizvi, S. S. H.** (1995). Thermodynamic Properties of Foods in Dehydratation. En "Engineering Properties of Foods". **Rao, M.A.** y Rizvi, S.S.H. Editorial Marcel Dekker. N.Y.
- Rooney, L. W.,** (1982). Tortilla y alimentos tipo botana de maíz nixtamalizado. Soya noticias oct-dic. 1-7.
- Rubio, M.** (1993). La industria de la harina y la tortilla de maíz. *Industria Alimentaria*, **15** (6): 9-19.
- Sabarez, H. T.;** Price, W. E. (1999). A diffusion Model for Prune Dehydration. *Journal of Food Engineering*, **42**(1999): 167-172.
- Saguy, I.;** Kopelman, I. J.; Mizrahi, S. (1980). Computer-aided prediction of beet pigment (betanine and vulgaxanthin-I) retention during air-drying. *Journal of Food Science*, **45**:230-235.
- Saravacos, G. D.** (1995). Mass Transfer Properties of Foods. En "Engineering Properties of Foods". **Rao, M. A.** y Rizvi, S. S. H. Editorial Marcel Dekker. N. Y.
- Saravacos, G. D.;** Maroulis, Z. B. (2001). Transport Properties of Foods. Editorial Marcel Dekker. N. Y.
- Serna-Saldívar SO, Gómez MH & Rooney LW.** Technology, chemistry and nutritional value of alkaline-cooked corn products. Cap. 4. In: Advances in Cereal Science and Technology. Vol X., Y. Pomeranz (Ed.). American Association of Cereal Chemist. St. Paul MN. 1990. p.243-307.
- StatSoft Inc,** (1997). Statistica for windows. Computer program manual. Tulsa, OK: StatSoft, WEB: <http://www.statsoft.com>
- Toğrul, I. T. ;** Pehlivan, D. (2003). Modelling of Drying Kinetics of single Apricot. *Journal of Engineering*, **58**(2003): 23-32.
- Thomas, D. J.;** Atwell, W. A. (1999). Starches. Editorial Eagan Press Handbook Series. N. Y.
- Thomson, W. J.** (2000). Introduction at Transport Phenomena. Editorial Prentice Hall. N. J.



**Treybal**, R. E. (1995). Operaciones de transferencia de masa. 2<sup>a</sup> ed. Editorial McGraw-Hill. México.

**Turhan**, M.; Erdoğdu, F. (2004). Error Associated with assuming a finite regular geometry as an infinite one for modelling of transient and mass heat and mass transfer processes. *Journal of Food Engineering*, **59**(2004): 291-296.

**Yamamoto**, S.; Sacki, T. (2000). Drying of Gelled Sugar Solutions-Water Diffusion Behavior. *Chemical Engineering*, 86(2002):179-184.



# Anexos





## *ANEXOS*

### **Anexo A**

#### **Puesta en marcha de la termobalanza**

La termobalanza fue puesta en funcionamiento de acuerdo a la secuencia presentada a continuación, la toma de mediciones de temperatura, tiempo y peso fue programada cada 30 s.

#### Puesta en marcha de la termobalanza

1. Conectar la termobalanza Ohaus al CPU de la computadora personal para establecer comunicación directa, fue empleado un cable RS-232 (Hyper terminal).
2. Encender la computadora personal al igual que la termobalanza.
3. Programar en la termobalanza el tiempo de registro de los pesos cada 30 s. por el tiempo que dure la prueba, y la temperatura de 50 °C para el análisis de cada uno de los experimentos.
4. Crear y guardar un archivo en Excel para almacenar los datos de peso, temperatura y tiempo registrados en una carpeta específica.
5. Tarar la termobalanza y confirmar que no exista error de conexión y comunicación entre ambos equipos.
6. Colocar la tortilla que será analizada en la charola de aluminio e introducirla dentro de la termobalanza y, finalmente cerrar la puerta.
7. Una vez colocada la tortilla iniciar la toma de lecturas de peso. La prueba termina cuando las muestras registren peso constante.
8. Los datos de peso son almacenados temporalmente en la ventana de la Hyper Terminal pero es necesario copiarlos al archivo de Excel creado



anteriormente para no perderlos, ya que después de 4 horas estos serán borrados automáticamente.

9. Una vez terminada la prueba se guardan los datos en el archivo y se cierran los programas.
10. Retirar la tortilla de la charola.
11. Limpiar perfectamente la termobalanza y apagarla al igual que la computadora.
12. Desconectar todo el equipo.



## Anexo B

### Ejemplo de secuencia de cálculos

Se presenta a continuación un ejemplo de uso de la secuencia de cálculo para la velocidad de secado y del coeficiente efectivo de difusión de agua. Los datos que se presentan corresponden a los de cinética de secado de una tortilla de HMN sin la adición de humectantes.

Para ejemplificar los cálculos se tomaron los tres primeros valores de masa ( $W$ ) que se presentan en el cuadro 1A, que corresponden a los tiempos 0 s., 30s. y 60 s.

Datos requeridos:

$$r = 4.35 \text{ cm.}$$

$$L = 1.5 \text{ mm} = 0.15 \text{ cm.}$$

$$W_0 = 14.014 \text{ g}$$

$$X_e = 0.000293945$$

Los valores de  $A$ ,  $W_s$ ,  $X$ ,  $X_t$ , y  $\bar{X}$ , se obtienen mediante los cálculos realizados con las ecuaciones de la 1 a la 5, hasta llegar a R.

#### 1. Velocidad de secado.

1. Cálculo del área de secado. La muestra utilizada tiene una forma de una placa circular.

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi(4.35)^2$$

$$A = 59.44678699 \text{ cm}^2$$



2. Cálculo de la masa del sólido seco. Cada uno de los experimentos se detuvo automáticamente cuando no se percibía variación de peso en la muestra colocada dentro de la termobalanza, por lo tanto el último valor arrojado se tomó como  $W_s$  sin obtenerlo mediante cálculos. Para este experimento el valor corresponde a:

$$W_s = 6.804$$

3. Cálculo de la humedad en base seca. En estos cálculos el subíndice de los diferentes valores de  $W$  corresponden a los tiempos en que se tomó la lectura de peso de la tortilla.

$$X_{t0} = \frac{W_0 - W_s}{W_s}$$

$$X_{t0} = \frac{14.014 - 6.804}{6.804}$$

$$X_{t0} = 1.059670782 \text{ g agua / g sólido seco}$$

$$X_{t1} = \frac{W_{30} - W_s}{W_s}$$

$$X_{t1} = \frac{13.970 - 6.804}{6.804}$$

$$X_{t1} = 1.053203998 \text{ g agua / g sólido seco}$$

$$X_{t3} = \frac{W_{60} - W_s}{W_s}$$

$$X_{t3} = \frac{13.970 - 6.804}{6.804}$$

$$X_{t3} = 1.044532628 \text{ g agua / g sólido seco}$$



4. Cálculo de humedad libre.

$$X_0 = X_{t0} - X_e$$

$$X_0 = 1.059670782 - 0.000293945$$

$$X_0 = 1.059376837 \text{ Kg agua / Kg sólido seco}$$

$$X_1 = X_{t30} - X_e$$

$$X_1 = 1.053203998 - 0.000293945$$

$$X_1 = 1.052910053 \text{ Kg agua / Kg sólido seco}$$

$$X_2 = X_{t60} - X_e$$

$$X_2 = 1.044532628 - 0.000293945$$

$$X_2 = 1.044238683 \text{ Kg agua / Kg sólido seco}$$

5. Cálculo de la humedad libre media.

$$\bar{X}_0 = \frac{X_0 + X_1}{2}$$

$$\bar{X}_0 = (1.059376837 + 1.052910053) / 2$$

$$\bar{X}_0 = 1.056143445 \text{ Kg agua / Kg sólido seco}$$

$$\bar{X}_1 = \frac{X_1 + X_2}{2}$$

$$\bar{X}_1 = (1.052910053 + 1.044238683) / 2$$

$$\bar{X}_1 = 1.048574368 \text{ Kg agua / Kg sólido seco}$$

$$\bar{X}_2 = \frac{X_2 + X_3}{2}$$

$$\bar{X}_2 = (1.044238683 + 1.036743092) / 2$$

$$\bar{X}_2 = 1.040490888 \text{ Kg agua / Kg sólido seco}$$



6. Cálculo de la velocidad de secado.

$$R_0 = \frac{W_s (X_0 - X_1)}{A (t_1 - t_0)}$$

$$R_0 = \frac{6.804}{59.44678699} \frac{(1.059376837 - 1.052910053)}{(30 - 0)}$$

$$R_0 = 2.46719E-05 \text{ Kg agua / s cm}^2$$

$$R_1 = \frac{W_s (X_1 - X_2)}{A (t_2 - t_1)}$$

$$R_1 = \frac{6.804}{59.44678699} \frac{(1.052910053 - 1.044238683)}{(60 - 30)}$$

$$R_1 = 3.30828E-05 \text{ Kg agua / s cm}^2$$

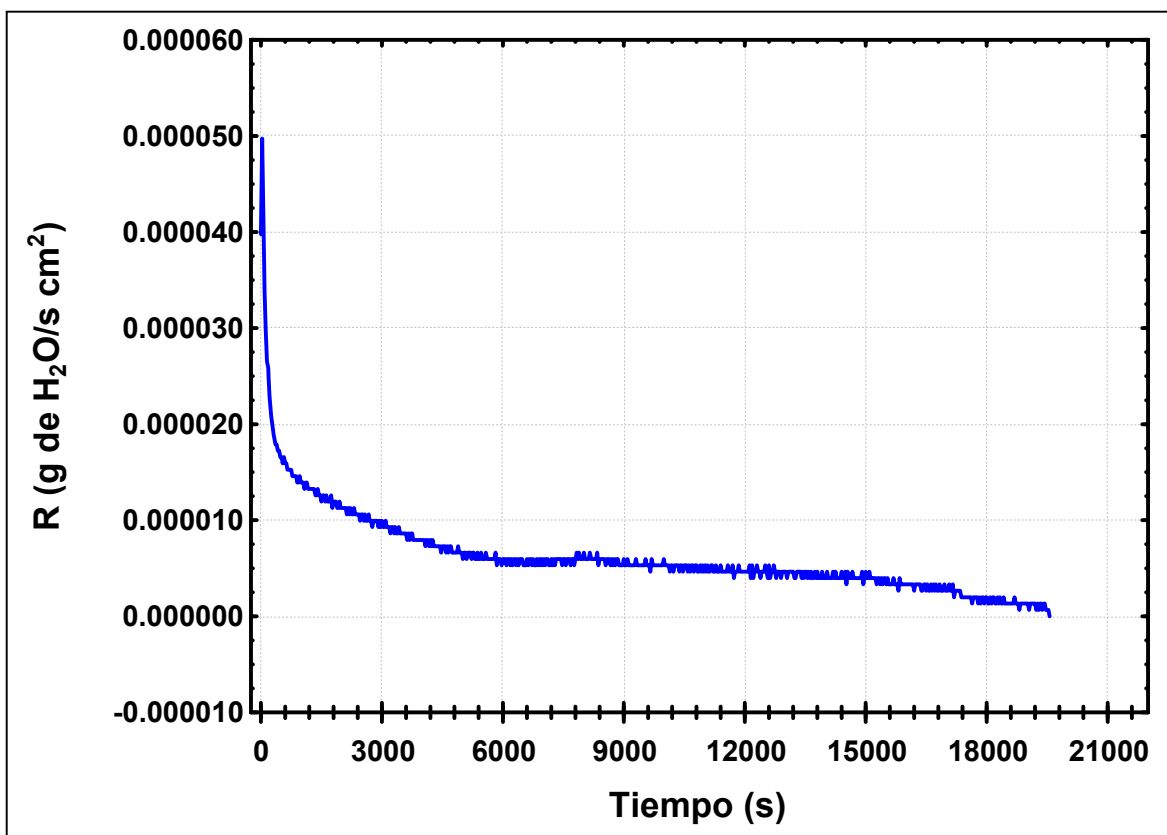
$$R_2 = \frac{W_s (X_2 - X_3)}{A (t_3 - t_2)}$$

$$R_2 = \frac{6.804}{59.44678699} \frac{(1.044238683 - 1.036743092)}{(90 - 60)}$$

$$R_2 = 2.8597E-05 \text{ Kg agua / s cm}^2$$

Los resultados de la secuencia de cálculo de todos los datos considerados se presentan en el cuadro 1A y se presentan de manera gráfica en la figura 1A.

Para efecto de comparación de los resultados entre el control, que corresponde a las tortillas sin humectante y las tortillas adicionadas con los humectantes empleados (glicerol y manitol a las diferentes concentraciones), las gráficas de velocidad de secado se construyen con la variación del peso de la tortilla analizada en el eje de las ordenadas y el tiempo de secado en el eje de las abscisas, como se muestra en el ejemplo siguiente (Figura 1B).



**Figura 1A.** Curvas de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre (ejemplo de uso de secuencia de cálculo).



**Cuadro 1A.** Resultados de la secuencia de cálculo para obtener las curvas de cinética de secado de las tortillas elaboradas en cada experimento.

Tiempo (s)	W (g)	$X_t$ (g H <sub>2</sub> O / g s.s.)	X (g H <sub>2</sub> O / g s.s.)	$\bar{X}$ (g H <sub>2</sub> O / g s.s.)	R <sub>H<sub>2</sub>O</sub> / s cm <sup>2</sup> ) (g)
0	14.014	1.059670782	1.059376837	1.056143445	2.46719E-05
30	13.97	1.053203998	1.052910053	1.048574368	3.30828E-05
60	13.911	1.044532628	1.044238683	1.040490888	2.8597E-05
90	13.86	1.037037037	1.036743092	1.033436214	2.52327E-05
120	13.815	1.03042328	1.030129336	1.027189888	2.2429E-05
150	13.775	1.024544386	1.024250441	1.021457966	2.13076E-05
180	13.737	1.018959436	1.018665491	1.016019988	2.01861E-05
210	13.701	1.01366843	1.013374486	1.010949442	1.85039E-05
240	13.668	1.008818342	1.008524397	1.00617284	1.79432E-05
270	13.636	1.004115226	1.003821282	1.00154321	1.73825E-05
300	13.605	0.999559083	0.999265138	0.997134039	1.6261E-05
330	13.576	0.995296884	0.995002939	0.992945326	1.57003E-05
360	13.548	0.991181658	0.990887713	0.9888301	1.57003E-05
390	13.52	0.987066432	0.986772487	0.98478836	1.51396E-05
420	13.493	0.983098178	0.982804233	0.980820106	1.51396E-05
450	13.466	0.979129924	0.978835979	0.976925338	1.45789E-05
480	13.44	0.975308642	0.975014697	0.973104056	1.45789E-05
510	13.414	0.97148736	0.971193416	0.969356261	1.40181E-05
540	13.389	0.967813051	0.967519106	0.965608466	1.45789E-05
570	13.363	0.96399177	0.963697825	0.96186067	1.40181E-05
600	13.338	0.96031746	0.960023516	0.958186361	1.40181E-05



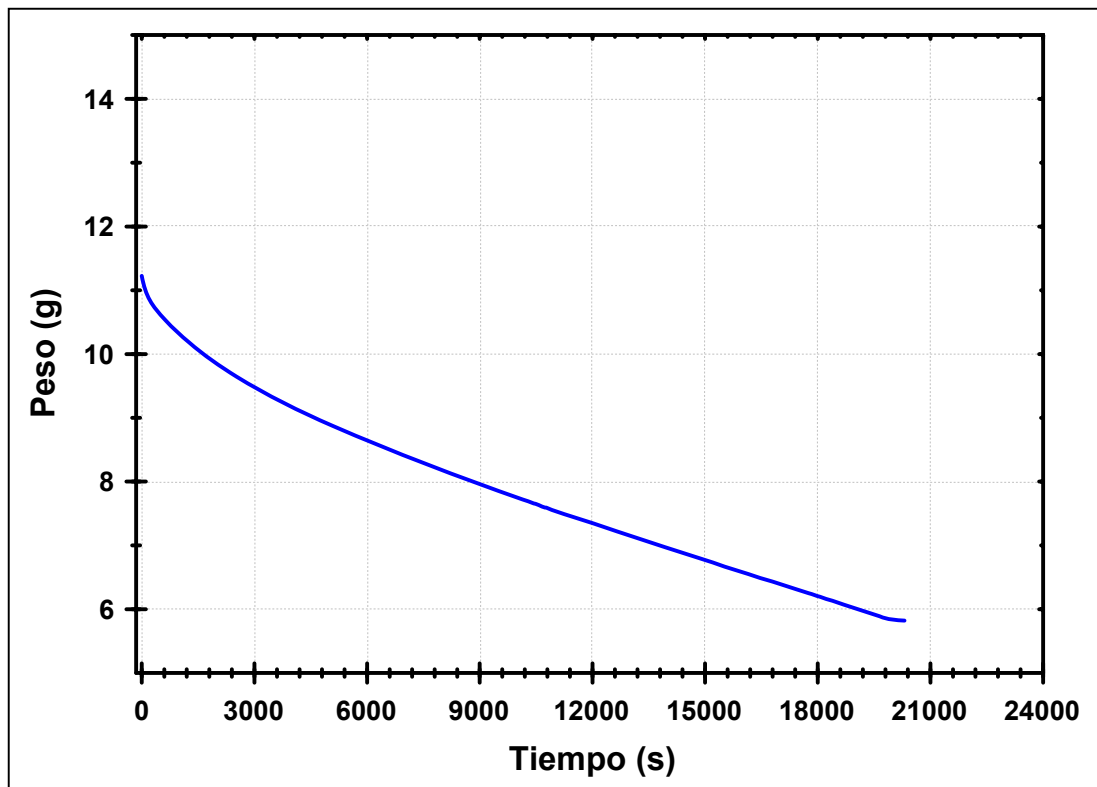


Figura 1B. Curvas de velocidad de secado (peso de la tortilla en función del tiempo)



II. Coeficiente efectivo de difusión de agua.

Para el cálculo del  $D_{efw}$  se obtiene primero el contenido adimensional de humedad de la tortilla (E), de la siguiente forma:

$$E_0 = \frac{X_{t0} - X_e}{X_0 - X_e}$$

$$E_0 = \frac{1.059670782 - 0.000293945}{1.059670782 - 0.000293945}$$

$$E_0 = 1$$

$$E_1 = \frac{X_{t30} - X_e}{X_0 - X_e}$$

$$E_1 = \frac{1.053203998 - 0.000293945}{1.059670782 - 0.000293945}$$

$$E_1 = 0.993895671$$

$$E_2 = \frac{X_{t60} - X_e}{X_0 - X_e}$$

$$E_2 = \frac{1.044532628 - 0.000293945}{1.059670782 - 0.000293945}$$

$$E_2 = 0.985710322$$

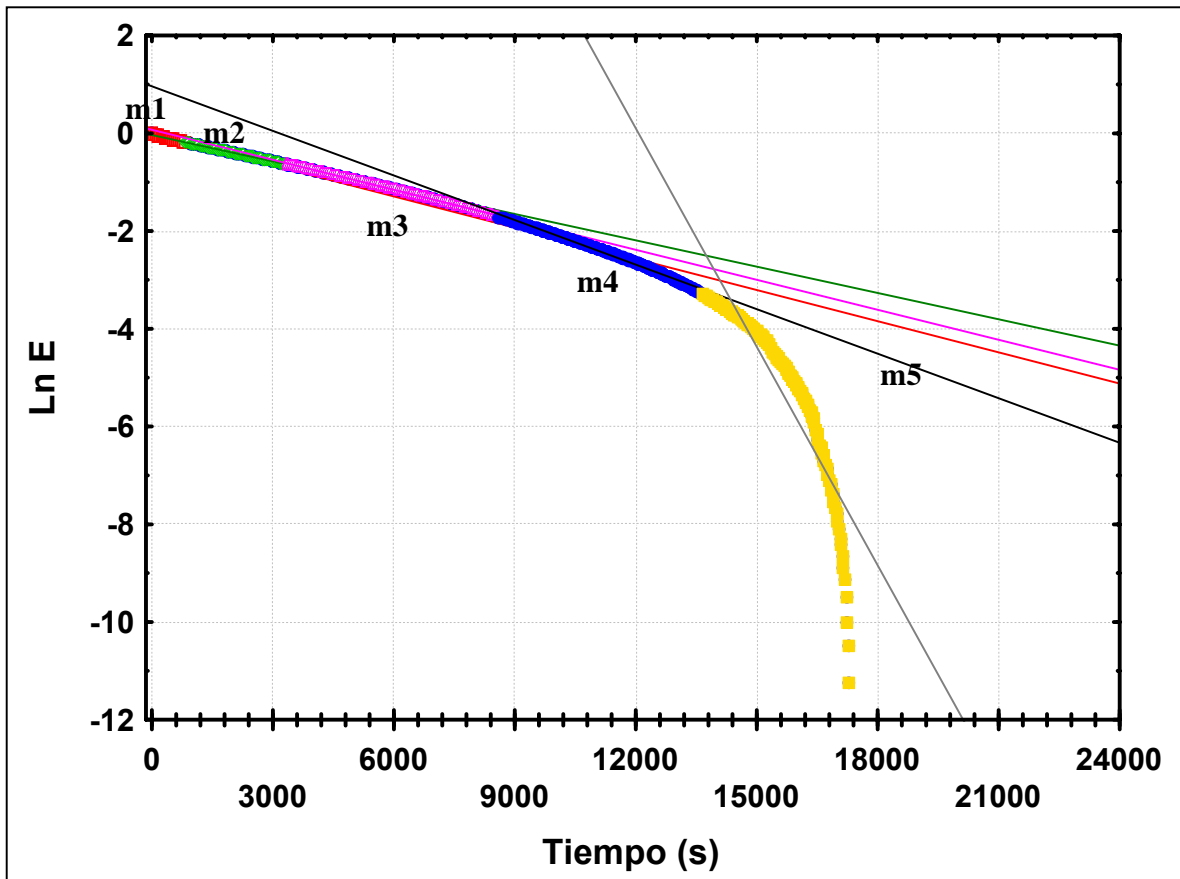
Los resultados del cálculo de E se presentan en el cuadro 2A al igual que los valores de Ln E para posteriormente graficarlos como se muestra en la figura 2A.

Una vez trazada la curva de Ln E se dibujan las líneas correspondientes a cada zona como lo indica la figura 2ª y se resuelve la ecuación de la pendiente para cada una de las líneas dibujadas sobre la curva de Ln E contra tiempo y se sustituye el valor obtenido en la ecuación 14 con los valores de las 5 pendientes obtenidas.



**Cuadro 2A.** Datos de E para el cálculo del  $D_{efw}$ .

Tiempo (s)	Xt (g H <sub>2</sub> O / g S.S.)	E	Ln E
0	1.059671	1	-1.45711E-10
30	1.053204	0.993896	-0.008833674
60	1.044533	0.98571	-0.020764362
90	1.037037	0.978635	-0.031157436
120	1.030423	0.972392	-0.040390387
150	1.024544	0.966842	-0.048647356
180	1.018959	0.96157	-0.056535493
210	1.013668	0.956576	-0.06404846
240	1.008818	0.951998	-0.070969885
270	1.004115	0.947558	-0.077713433
300	0.999559	0.943257	-0.084276442
330	0.995297	0.939234	-0.090443178
360	0.991182	0.93535	-0.096422384
390	0.987066	0.931465	-0.102426474
420	0.983098	0.927719	-0.108239894
450	0.97913	0.923973	-0.114076834
480	0.975309	0.920366	-0.119719999
510	0.971487	0.916759	-0.125385325
540	0.967813	0.913291	-0.130853814



**Figura 2A.** Curva del contenido adimensional de humedad contra tiempo (ejemplo de secuencia de cálculo) (cada color de la curva indica las diferentes zonas).

zona 1 = m1= -0.0002127760  
zona 2 = m2= -0.0001795616  
zona 3 = m3= -0.0002045897  
zona 4 = m4= -0.0003037733  
zona 5 = m5= -0.0014903683



El cálculo de la pendiente (m) de la figura 2A se realizó por regresión lineal.

$$D_{efw1} = - \frac{L^2 m_1}{\pi^2}$$

$$D_{efw1} = - \frac{(0.0015)^2 (-0.0002127760)}{(3.1416)^2}$$

$$D_{efw1} = 4.78746 \text{ E-10 m}^2/\text{s}$$

$$D_{efw2} = - \frac{L^2 m_2}{\pi^2}$$

$$D_{efw2} = - \frac{(0.0015)^2 (-0.0001795616)}{(3.1416)^2}$$

$$D_{efw2} = 4.04014 \text{ E-10 m}^2/\text{s}$$

Para verificar si estadísticamente existía o no diferencia significativa entre los valores de  $D_{efw}$  correspondientes a cada zona de la curva de todos los experimentos realizados se hizo un análisis de varianza de una sola vía.

**Nota:** La metodología antes descrita para el cálculo de los resultados, fue empleada en cada uno de los experimentos, en donde se analiza la textura de las tortillas adicionadas o no con humectantes a diferentes concentraciones y se obtienen las cinéticas de secado así como el cálculo del coeficiente efectivo de difusividad del agua.

