

OBTENCIÓN DE ISOTERMAS DE DESORCIÓN DE AGUA EN GUAYABA
(*Psidium guajava* L.)

KATHERIN GARCÍA POSADA
OSCAR ENRIQUE LARMAT DELGADO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA INGENIERÍA DE ALIMENTOS
Santiago de Cali (Colombia)
2011

OBTENCIÓN DE ISOTERMAS DE DESORCIÓN DE AGUA EN GUAYABA
(*Psidium guajava* L.)

KATHERIN GARCÍA POSADA
OSCAR ENRIQUE LARMAT DELGADO

Trabajo de Grado para optar por el título de
Ingeniero de alimentos

Director
Claudia Isabel Ochoa Martínez, Ph.D.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA INGENIERÍA DE ALIMENTOS
Santiago de Cali (Colombia)
2011

DEDICATORIA

A nuestros padres por todo lo que nos han dado en esta vida, especialmente por sus sabios consejos y por estar a nuestro lado en los momentos difíciles.

A nuestras familias quienes han sido un gran apoyo y motivación.

A nuestros amigos quienes nos apoyaron y se convirtieron en nuestra familia adoptiva haciéndonos sentir como en casa cuando lo necesitamos.

AGRADECIMIENTOS

A la profesora Claudia Isabel Ochoa por su paciencia, por siempre recibirnos con buena disposición, aconsejarnos y apoyarnos en este proceso.

Al profesor Carlos Julián Giraldo que más que profesor es amigo y nos ayudó y aconsejó tanto como le fue posible.

A nuestro compañero Hader Quintero quien hizo más fácil la estadía en el laboratorio, por su apoyo, su colaboración y sus regaños.

A toda la Escuela de Ingeniería de Alimentos quienes hicieron posible la terminación de este documento para así convertimos en los próximos Ingenieros de Alimentos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	13
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo general.....	14
2.2. Objetivos específicos	14
3. MARCO TEÓRICO	15
3.1. Generalidades de la guayaba.....	15
3.2. Actividad de agua (a_w).....	16
3.3. Isotermas de sorción.....	17
3.4. Tipos de isotermas.....	18
3.5. Fenómeno de histéresis	20
3.6. Efecto de la temperatura sobre las isotermas de sorción	21
3.7. Determinación de datos de equilibrio	22
3.8. Modelos matemáticos	22
3.8.1. Modelo de Brunauer, Emmett y Teller (BET)	23
3.8.2. Modelo de GAB	23
3.8.3. Modelo de PELEG.....	24
3.8.4. Modelo de OSWIN.....	24
3.9. Calor isostérico neto de desorción	25
3.10. Calor de sorción de la monocapa	26
4. ANTECEDENTES.....	27
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
5.1. Materiales	29
5.1.1. Materia prima.....	29

5.1.2. Equipos	29
5.2. Métodos	29
5.2.1. Preparación de las soluciones salinas	29
5.2.2. Preparación de las muestras	30
5.2.3. Montaje del experimento.....	31
5.2.4. Evaluación de los modelos matemáticos	32
5.2.5. Diseño experimental.....	33
6. ANÁLISIS Y RESULTADOS	35
6.1. Isotermas de desorción	35
6.2. Ajuste a los modelos matemáticos	39
6.3. Comparación entre las isotermas modeladas que mejor se ajustaron a las tres temperaturas	43
6.4. Calor isostérico	45
CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición de la guayaba	15
Tabla 2. Antecedentes	27
Tabla 3. Sales para la preparación de los ambientes controlados	30
Tabla 4. Diseño experimental.....	33
Tabla 5. Resumen de datos experimentales	35
Tabla 6. Parámetros y estadística para cada modelo ajustado	39
Tabla 7. Diferencia entre las isotermas mejor ajustadas y los datos experimentales	43
Tabla 8. Anova y prueba de Tukey para 40°C.....	44
Tabla 9. Anova y prueba de Tukey para 55°C.....	44
Tabla 10. Anova y prueba de Tukey para 67°C.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Isotermas típicas de la adsorción física.....	20
Figura 2. Fenómeno de histéresis en una isoterma de sorción	21
Figura 3. Efecto de la temperatura sobre las isotermas de sorción.....	22
Figura 4. Muestras de pulpa de guayaba	31
Figura 5. Muestra de pulpa de guayaba en la solución salina.....	31
Figura 6. Esquema del montaje del experimento dentro de cada frasco.....	32
Figura 7. Curvas de pérdida de humedad a 40°C	36
Figura 8. Curvas de pérdida de humedad a 55°C	37
Figura 9. Curvas de pérdida de humedad a 67°C	37
Figura 10. Isotermas de desorción de humedad de guayaba a 40°C, 55°C y 67°C	38
Figura 11. Ajuste de los modelos a los datos experimentales a 40°C.....	40
Figura 12. Ajuste de los modelos a los datos experimentales a 55°C.....	41
Figura 13. Ajuste de los modelos a los datos experimentales a 67°C.....	41
Figura 14. Isotermas de desorción modeladas con PELEG.....	42
Figura 15. Variación del calor isostérico de desorción con el contenido de humedad en equilibrio	45
Figura 16. Variación del calor isostérico de desorción con el contenido de humedad de guayaba modelado por la ecuación de Tsami	46

NOMENCLATURA

a_w	Actividad de agua
A,B,C,D	Parámetros obtenidos para cada modelo
E%	Error relativo promedio porcentual
g/g.s.s	Gramos de agua/gramos de sólido seco
H.b.s.	Humedad en base seca
HRE	Humedad relativa de equilibrio
m	Agua adsorbida
n	Número de datos experimentales
P	Probabilidad
P_w	Presión de vapor del agua en equilibrio con el alimento
P_w^0	Presión de vapor del agua pura a la misma temperatura
q_o	Calor isostérico de sorción de la monocapa
q_{ST}	Calor isostérico
R	Constante universal de los gases
R^2	Coefficiente de correlación
T	Temperatura
X_i	Humedad experimental
X_{eq}	Contenido de humedad en equilibrio
X_{pi}	Humedad prevista
X_o	Humedad característica del alimento en el cual el calor isostérico neto se ha reducido en 63%
ΔH_d	Calor diferencial de adsorción
λ_{vap}	Calor latente de vaporización del agua pura

RESUMEN

En la industria de alimentos, realizar trabajos de investigación es de vital importancia para lograr su desarrollo y conocer mejor las materias primas, sobre todo las autóctonas de nuestro país, de este modo se tienen nuevas posibilidades de comercialización a nivel internacional. El propósito de esta investigación es determinar experimentalmente las isothermas de desorción de la guayaba (*Psidium guajava*) por el método gravimétrico estático a tres temperaturas (40, 55 y 67°C), para obtener una relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad en equilibrio de la guayaba. El equilibrio se alcanzó en 8 días de estar las muestras bajo las condiciones experimentales. Las isothermas obtenidas se ajustaron a los modelos de BET, GAB, PELEG y OSWIN. El modelo de PELEG presentó el mayor coeficiente de correlación (R^2) comparado con los otros modelos. No se encontraron diferencias significativas entre las isothermas a 40°C, 55°C y 67°C, al determinar la influencia de la temperatura sobre la humedad de equilibrio a un valor de actividad de agua. Las isothermas obtenidas son isothermas tipo 3, según la clasificación de Brunauer, con una ligera tendencia a ser tipo 2 a medida que aumenta la temperatura por encima de 40°C. Adicionalmente se calculó el calor isostérico neto de desorción en función de la humedad en equilibrio con la ecuación de Clausius-Clapeyron; el calor isostérico de desorción máximo se obtuvo en el rango de contenido de humedad de 0,1 – 0,2 g/g s.s y entre 1,2 y 1,5 kJ/mol; el calor de desorción de la monocapa obtenido por el modelo de Tsami fue 7,99 kJ/mol.

INTRODUCCIÓN

La guayaba pertenece a la familia *Myrtaceae*, género *Psidium*. En Colombia su cultivo se encuentra altamente distribuido y constituye un importante alimento en las regiones tropicales (DAPV (Colombia), 1994). La guayaba es rica en vitaminas A, que puede alcanzar valores de 200 mg/ 100 g de fruta, y C, que puede alcanzar valores de 300 mg/ 100 g de fruta, también en minerales como fósforo y calcio (Baraona et al., 1992). Además contiene entre 75 y 90 % de humedad (Medina et al., 2003), lo que significa que es propensa al deterioro, sobre todo si va a ser almacenada.

La guayaba es muy apetecida a nivel mundial por sus propiedades y usos en la industria alimentaria, pero el almacenamiento y/o exportación de guayaba presenta dificultades ya que pierde su calidad nutricional fácilmente (DAPV (Colombia), 1994), además existen pérdidas post-cosecha hasta del 60% por sobreproducción y falta de mercadeo (Rivera et al., 1997).

La deshidratación o secado de alimentos es una de las operaciones unitarias más utilizadas en la conservación de los mismos (Ibarz et al., 2005), sin embargo, se ignoran los aspectos relacionados con la cinética de secado de guayaba y no se encuentra información acerca de sus isothermas de desorción, las cuales permiten conocer el tiempo de finalización de la operación. Las isothermas de sorción son la representación gráfica del contenido de humedad presente en el alimento contra la actividad de agua en condiciones isotérmicas, para un material que está en equilibrio higroscópico con el ambiente en que se encuentra y no existe cambio en el peso de la muestra (Zug, 2002).

La actividad de agua es uno de los factores más importantes en la conservación de los alimentos, de ésta depende la posibilidad de que se lleven a cabo diferentes

tipos de reacciones bio-químicas, así como el crecimiento de microorganismos que produzcan alteraciones o que sean patógenos (Rockland et al., 1987).

Las isothermas de desorción se pueden obtener experimentalmente por dos métodos: manométrico o gravimétrico, este último se divide en estático y dinámico. El método gravimétrico estático, utiliza frascos herméticos con diferentes soluciones salinas que garantizan sendas humedades relativas de equilibrio (Zug, 2002). El objetivo de este estudio será obtener isothermas de desorción de agua en guayaba, para esto se correlacionarán los datos obtenidos con los modelos matemáticos de GAB, BET, PELEG y OSWIN.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La guayaba tiene un alto contenido en vitaminas A y C y un alto contenido de humedad, por lo que es muy susceptible a perder su calidad nutricional durante el almacenamiento y distribución,(Rivera et al., 1997);su comercialización como fruta fresca presenta dificultad ya que la guayaba madura es muy frágil y se deteriora por daños mecánicos, sobremaduración, falta de mercadeo y plagas, siendo la alternativa más viable su industrialización (Murillo, N/A). Para conseguir mejor aprovechamiento de la guayaba, se puede efectuar un proceso de deshidratación, el cual disminuye el deterioro químico y microbiológico (Barbosa-Cánovas et al., 1996).

El proceso de deshidratación tiene como finalidad llegar a la más baja humedad permisible en el alimento, provocando el menor daño posible, este proceso está acoplado a la humedad relativa y a la temperatura de deshidratación. La humedad de equilibrio a la cual llega el alimento es un valor que se requiere para conocer el tiempo que toma la deshidratación.

¿Cómo conocer la humedad de equilibrio, a la que llega la guayaba con las condiciones de deshidratación, que se requiere para conocer el tiempo de deshidratación? Para conocer la humedad en equilibrio es necesario el conocimiento de las isothermas que permiten relacionar la humedad en equilibrio con la humedad relativa a una temperatura.

Las isothermas de sorción de humedad son útiles para: (a) determinar el tiempo necesario en los procesos de concentración y deshidratación, (b) formular la impermeabilidad (propiedades barrera antigases) requerida en el material de envasado, (c) determinar el contenido de humedad que impide el crecimiento de los microorganismos de interés, y (d) predecir la estabilidad química y física de los alimentos, en función del contenido de agua (Fennema, 1996). La isoterma de desorción de guayaba no se encuentra en la literatura.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Obtener mediante el método gravimétrico la isoterma de desorción de la guayaba a diversas temperaturas de interés práctico en el secado.

2.2. Objetivos específicos

Obtener la relación, actividad del agua y contenido de humedad en la guayaba, a diferentes condiciones de almacenamiento (temperatura y humedad relativa).

Ajustar los datos experimentales a los modelos propuestos en la literatura, para la predicción de las isothermas de sorción en el producto.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Generalidades de la guayaba

La guayaba (*Psidium guajava* L.) es una baya de forma variada, puede ser redonda, ovoideo alargada. El color del fruto puede ser amarillo, rojo o rosado; presenta olor característico y tamaño variado, con un peso de 25 hasta 200 g. El mayor valor nutritivo de la guayaba radica en su alto contenido de ácido ascórbico (vitamina C), alrededor de 300 mg/100g de pulpa, como se muestra en la Tabla 1(Murillo, N/A). Esta situación hace que la guayaba se utilice como ingrediente para preparar otros jugos y purés a fin de fortificar su contenido de vitamina, además la guayaba es uno de los pocos cultivos que no han sido contaminados con químicos. La guayaba rosada es la de más alta calidad por su contenido de azúcares y alto rendimiento en la producción de derivados (Rivera et al., 1997).

Tabla 1. Composición de la guayaba

Composición química %		Contenido vitamínico (mg/100g de pulpa)	
Agua	78.00	Vitamina A	200
Proteínas	0.95	Vitamina B3	40
Grasa	0.45	Vitamina C	300
Azúcar	8.85	Vitamina G4	35
Carbohidratos	2.85		
Fibra	8.50		

La guayaba es una fruta muy perecedera debido a que una vez cosechada el proceso de respiración continúa, es conveniente que el período entre la cosecha y el procesamiento sea lo más corto posible a fin de preservar las características organolépticas del producto (Murillo, N/A).

La guayaba es una de las especies frutícolas de mayor importancia a nivel campesino, se comercializa en los mercados interno y externo por su alta distribución y gran potencialidad. Además de ser consumida en fresco, también es materia prima para el desarrollo de la industria del bocadillo, de néctares y de jugos procesados (Uribe, 1998).

3.2. Actividad de agua (a_w)

El agua contenida en un alimento, está más o menos disponible para participar en las reacciones físicas, químicas y microbiológicas. Esta disponibilidad varía de un producto a otro según su composición, algunas estructuras o moléculas retienen más agua que otras; varía incluso para un mismo producto, un fruto maduro no se comporta de la misma forma que un fruto verde (Casp et al., 1999).

La definición de la a_w , como lo muestra la ecuación (1) tiene su fundamento en el equilibrio asumido entre el alimento y su entorno gaseoso, por el cual los valores de a_w , deben ser iguales en ambas fases a T y P constantes.

$$a_w = \frac{P_w}{P_w^0} \quad (1)$$

Donde P_w es la presión de vapor del agua en equilibrio con el alimento y P_w^0 es la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura. La humedad relativa de equilibrio (HRE) se relaciona con la a_w por la ecuación (2) (Martínez, 1998):

$$\text{HRE (\%)} = 100 a \quad (2)$$

El concepto de actividad de agua ha recibido mucha atención desde hace más de dos décadas, fundamentalmente porque se considera que es uno de los parámetros más importantes que influyen en las reacciones de deterioro de los

alimentos (Casp et al., 1999). Se han llevado a cabo numerosos estudios sobre diferentes aspectos relativos a la actividad de agua, incluyendo metodologías de predicción y medida, efectos sobre la calidad y estabilidad de los alimentos e isothermas de sorción. Se estableció la seguridad de determinados alimentos en términos de su actividad de agua: “una a_w será considerada segura para un alimento si se proporcionan los datos adecuados que demuestren que el alimento a esa a_w o por debajo de ella no permite el crecimiento de microorganismos”(Martínez, 1998).

3.3. Isothermas de sorción

Las isothermas de sorción de humedad son representaciones gráficas de a_w y contenido de agua (expresado como masa de agua por unidad de masa de materia seca) a una temperatura (Fennema, 1996). La sorción de vapor de agua puede ocurrir en ambas direcciones, adsorción o desorción. La adsorción ocurre cuando los sólidos se exponen a condiciones donde la presión de vapor de agua es más elevada que la presión de vapor de agua dentro del sólido. El sólido absorbe agua hasta que la presión de vapor en la superficie del alimento y la atmósfera que lo rodea sean iguales. Bajo condiciones inversas, una baja presión de vapor de agua en los alrededores es la fuerza que conlleva a la desorción y el material pierde agua (Fox, 1997).

La isoterma de sorción del agua es una forma adecuada de analizar el grado de interacción del agua con el sustrato. Normalmente se puede dividir en tres intervalos en función de la a_w : agua fuertemente ligada correspondiente a una a_w de 0.2-0.3 ó inferior, agua moderadamente ligada (0.3-0.7) y agua poco ligada correspondiente a una a_w de 0.7 o superior (Martínez, 1998).

3.4. Tipos de isothermas

Cuando se habla de la superficie interna de un alimento corresponde a los poros que tenga éste. El tamaño de los poros posee considerable importancia, ya que para que su superficie pueda adsorber, es preciso que las moléculas de adsorbato puedan pasar a través. El sistema de poros puede ser muy extenso, llegando a ser en ocasiones de varios órdenes de magnitud superior a la superficie externa.(Martinez, 1998). En un sistema de poros las moléculas se irán adsorbiendo formando una monocapa, y a medida que aumenta la cantidad adsorbida, el adsorbato se ordena en capas sucesivas (multicapa). Hay tres clasificaciones de porosidad. Oficialmente la IUPAC ha clasificado ésta de acuerdo al diámetro del poro de la siguiente forma: microporos, por debajo de 2 nm, mesoporos, entre 2 y 10 nm, y macroporos mayores de 10 nm. Las isothermas de adsorción pueden ser de alguno de los tipos que se muestran en la Figura 1(Kolasinski, 2008). Las isothermas Tipo 1 resultan por sólidos microporosos que tienen pequeñas superficies externas, por las cuales la adsorción limitada está regida por el volumen de microporos accesibles y no por el área de superficie interna. Ésta es también la isoterma más comúnmente observada en las sorciones químicas, además no muestra el fenómeno de histéresis. Las isothermas Tipo 2 son reversibles, también; presentan la adsorción en la monocapa que está seguida por una condensación multicapa ilimitada. La sección lineal del medio de la isoterma Tipo 2 se toma a menudo como la indicación de la transición desde la terminación de la primera monocapa hacia la formación de la primera multicapa. La isoterma reversible Tipo 3, es convexa hacia el eje de la a_w sobre todo su rango. Este tipo de isothermas se observan cuando interacciones laterales juegan un papel importante en la determinación de la entalpía de adsorción. Las isothermas Tipo 4 son irreversibles y exhiben un fenómeno de histéresis, el cual se asocia con una condensación capilar teniendo lugar en los mesoporos, estas isothermas también se caracterizan por limitar la adsorción en los rangos superiores de a_w . La parte inicial de las isothermas Tipo 4 es muy parecidas a las isothermas Tipo 2, las cuales se encuentran en muchos absorbentes industriales. Las isothermas Tipo 5 son poco comunes, están relacionadas con las isothermas Tipo 3 en que la interacción del

adsorbente-adsorbato es muy débil, pero se obtiene con ciertos adsorbentes porosos. Las isothermas Tipo 6 representan paso a paso adsorciones multicapas sobre una superficie no porosa uniforme. La altura del escalón representa la capacidad monocapa para cada capa y, en el caso más simple, permanece casi constante para dos o tres capas adsorbentes. Los mejores ejemplos de isothermas Tipo 6 se obtienen con Ar o Kr sobre carbonos grafitados a temperaturas de nitrógeno líquido (Kolasinski, 2008).

Las isothermas del Tipo 4 y 5 presentan dos características fundamentales: saturación e histéresis. Esto es debido a que el adsorbente (alimento) puede retener adsorbato hasta un límite según la capacidad de los poros. El tratamiento cuantitativo es difícil y no existen modelos completamente satisfactorios. La región de bajas presiones es idéntica a la de las isothermas Tipo 2 y Tipo 3. En esta zona la cantidad de moléculas adsorbidas es pequeña y la superficie interna de los poros se comporta igual que la externa. Sin embargo, si se sigue adsorbiendo, llega un momento en que los poros se llenan, dando una saturación que se refleja en una meseta (Martínez, 1998).

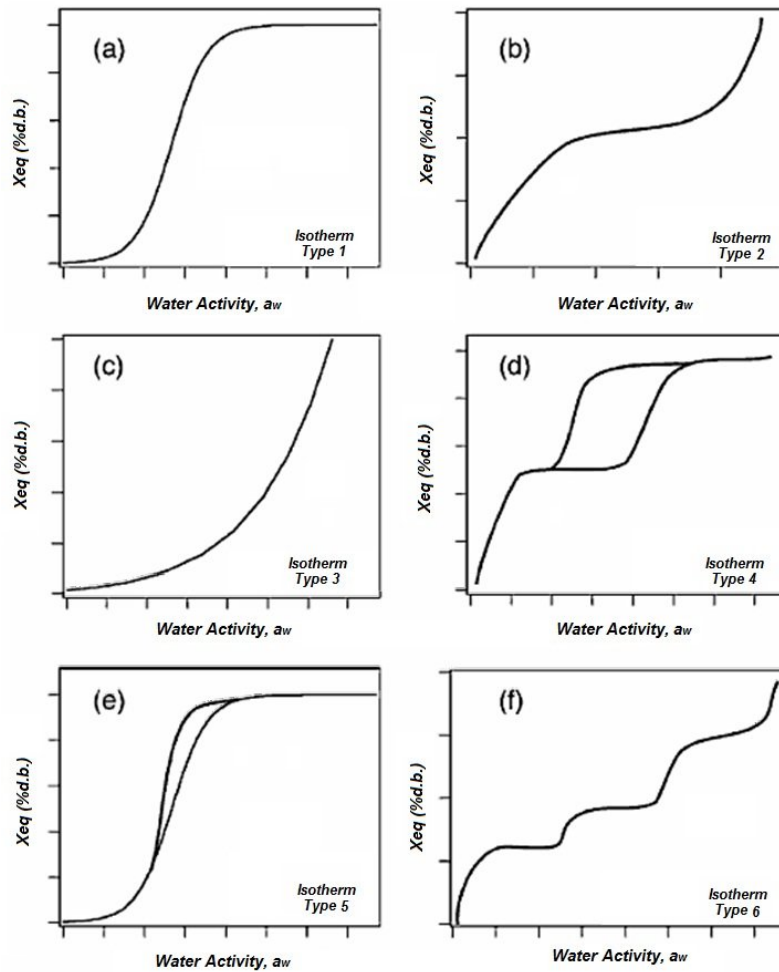


Figura 1. Isothermas típicas de la adsorción física

3.5. Fenómeno de histéresis

Una isoterma de sorción de agua realizada por adición de agua (resorción) a una muestra seca, no necesariamente se superpone sobre una isoterma realizada por desorción. Esta falta de coincidencia o desviación de ambas isothermas se conoce como histéresis, como se muestra esquemáticamente en la Figura 2. Típicamente, a cualquier a_w , el contenido de agua de la muestra será mayor durante la desorción que durante la adsorción (Fennema, 1996).

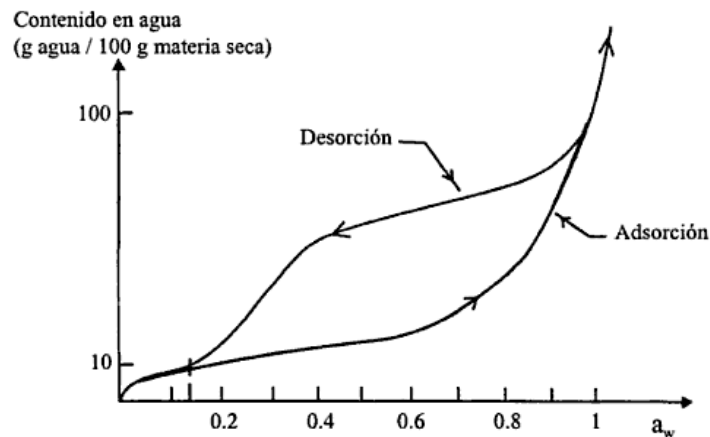


Figura 2. Fenómeno de histéresis en una isoterma de sorción

Fuente: (Fennema, 1996)

3.6. Efecto de la temperatura sobre las isotermas de sorción

La a_w disminuye ligeramente cuando la temperatura se incrementa. En otras palabras para una a_w dada, el contenido de agua de un producto será ligeramente más bajo a una temperatura más alta (Leninger, 1975), como se muestra en la Figura 3. La humedad relativa de equilibrio de un ambiente depende de la temperatura, ya que al haber un incremento de la temperatura, habrá un incremento en la presión parcial de vapor de agua, por lo tanto, en un alimento en un ambiente al cual se someta a un incremento de la temperatura, tenderá a perder agua en forma de vapor de agua, hasta que en un tiempo se iguale a la presión parcial de vapor de agua del medio. Este efecto hace que en las isotermas de sorción para un alimento, entre mayor sea la temperatura, menor será la cantidad de agua cuando se llega al equilibrio; en otras palabras las curvas de un alimento estarán cada vez más cerca del eje de a_w si se tienen temperaturas cada vez más elevadas (Levine, 1996).

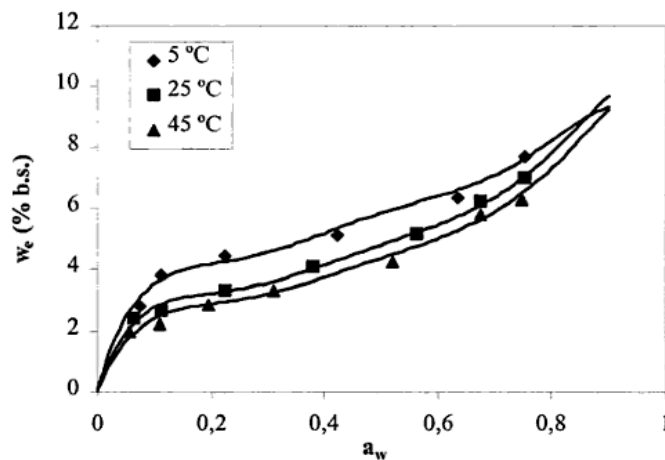


Figura 3. Efecto de la temperatura sobre las isoterma de sorción

Fuente: (Levine, 1996)

3.7. Determinación de datos de equilibrio

Los datos de equilibrio se pueden determinar utilizando alguna de las siguientes técnicas (Martínez, 1998):

- Técnicas manométricas o higrométricas, basadas en la determinación directa de la presión del vapor de agua o de la humedad relativa de la interfase de un sólido de contenido de humedad conocido.
- Técnicas gravimétricas, basadas en la determinación del contenido en humedad de la muestra después de que ésta ha alcanzado el equilibrio con un aire de humedad relativa conocida. Este procedimiento se puede desarrollar por métodos estáticos o dinámicos.

3.8. Modelos matemáticos

Las relaciones desarrolladas para ajustar la tendencia de una isoterma de sorción, pueden presentarse atendiendo a varios puntos de vista: orden cronológico, tipos

de alimentos en los que se recomienda, número de parámetros o constantes que están incluidos en la ecuación, etc. A continuación se presentan algunos modelos en base al número de parámetros considerados por el modelo y al año de aparición del mismo.

3.8.1. Modelo de Brunauer, Emmett y Teller (BET)

Brunauer, Emmett y Teller (BET), desarrollaron en 1938 la ecuación de sorción de BET (Ecuación 3) (Brunauer et al., 1938) que representa una base en la interpretación de isothermas multicapas de sorción.

$$m = \frac{A B a_w}{(1 - a_w)[1 + (B - 1)a_w]} \quad (3)$$

Donde m el agua adsorbida, A representa el agua total de sitios activos y B es la constante de BET. Esta ecuación se ha aplicado en adsorción de gases y vapores en superficies y sólidos porosos, como también en adsorción de vapor, especialmente de agua, por polímeros y otros materiales homogéneos (Zug, 2002).

3.8.2. Modelo de GAB

En casi todos los casos la desviación de la linealidad de los gráficos de BET indican que a altas presiones de vapor la cantidad sorbida por el sorbente, es menor que lo predicho por la isoterma. Esta debilidad fundamental ha sido corregida en la década de los 60 por Anderson, de Boer y Guggenheim en términos de una ecuación modificada de BET que reproduce el comportamiento experimental, hasta valores de actividad de agua menores o iguales a 0.8-0.9 (Zug, 2002), la ecuación (4) representa el modelo de GAB.

$$m = \frac{A C B a_w}{(1 - B a_w)(1 - B a_w + C B a_w)} \quad (4)$$

Donde m el agua absorbida, A representa el agua total de sitios activos, B y C son las constantes de GAB.

3.8.3. Modelo de PELEG

El modelo de PELEG obtenido por Peleg en 1993 es el modelo empírico más simple de cuatro parámetros y se utiliza para modelar isothermas de sorción de humedad en ambas formas, sigmoidal y no sigmoidal. La ecuación (5) que representa el modelo de PELEG incluye doble potenciación así:

$$m = A a_w^C + B a_w^D \quad (5)$$

Donde m el agua absorbida, A , B , C y D son constantes del modelo. (Barbosa, 2007)

3.8.4. Modelo de OSWIN

Es un modelo empírico desarrollado por Oswin en 1946, a partir de una serie de curvas en forma sigmoidal. En la ecuación (6) se representa el modelo.

$$m = A \left[\frac{a_w}{1 - a_w} \right]^B \quad (6)$$

Donde m el agua absorbida, A y B son constantes (Sahin et al, 2006).

3.9. Calor isostérico neto de desorción

El calor isostérico neto, q_{ST} , es el calor de desorción a una cantidad constante de adsorbato. Indica la variación de la energía ocurrida como producto de la separación de moléculas de agua y de sorbente durante la desorción y relaciona las fuerzas de atracción entre los sitios de sorción y el vapor de agua. En términos de la termodinámica se relaciona con la presión y temperatura (Condon, 2006).

Para realizar esta determinación se requiere de dos o más isothermas a temperaturas que sean cercanas. El calor isostérico neto de desorción se define como la diferencia entre, el calor diferencial de desorción o entalpía de desorción (ΔH_d) y el calor latente de vaporización del agua pura (λ_{vap}) a una cierta temperatura como se muestra en la ecuación 7. El q_{ST} se calcula a partir de la ecuación de Clausius-Clapeyron (ecuación 8), suponiendo que el calor latente de vaporización del agua pura, el calor del líquido y el equilibrio de adsorción de humedad se mantienen constantes con la variación de la temperatura. El q_{ST} es dependiente del contenido de humedad. (Ramírez, 2009).

$$q = \Delta H - \lambda \quad (7)$$

La Ecuación (8) se integra como se muestra en la Ecuación (9).

$$q = \frac{RT^2}{(p/p_s)} \quad (8)$$

$$\ln a = \frac{q_{ST}}{RT} + C \quad (9)$$

Donde R es la constante universal de los gases (kJ/molK) y T es la temperatura absoluta (K).

A una humedad de equilibrio (en el rango de humedades en que se encuentran las isothermas) para cada una de las temperaturas estudiadas, se obtienen de las isothermas modeladas las actividades de agua con que se relaciona esta humedad; Se grafica $\ln a_w$ vs $1/T$ y de la pendiente se despeja q_{ST} , este procedimiento se

repite para diferentes humedades de equilibrio, y finalmente en una gráfica se relaciona el calor isostérico neto con la humedad de equilibrio.

3.10. Calor de sorción de la monocapa

Para su determinación, Tsami et al. en 1990 desarrollaron una relación exponencial empírica entre el calor de sorción y el contenido de humedad, la cual se presenta en la ecuación (10).

$$q_{ST} = q_0 e^{\frac{-X_{eq}}{X_0}} \quad (10)$$

Donde q_0 es el calor isostérico de sorción de la monocapa molecular de agua, X_{eq} es el contenido de humedad de equilibrio del material y X_0 es una humedad característica del alimento en la cual el calor isostérico de sorción se reduce en 63%.

4. ANTECEDENTES

Los artículos mostrados en la Tabla 2 son trabajos realizados en el área de las isotermas, que han usado el método gravimétrico estático en la determinación de éstas en diferentes alimentos.

Tabla 2. Antecedentes

Título	Referencias	Modelos	T(°C)	Conclusión
Evaluation of various models of water adsorption Isotherms of a dried fruit powder (guanabana).	Ceballos et al., 2009	GAB, Oswin, Henderson y Peleg	20, 30, 40 y 50	Mejor ajuste GAB, se presentó inversión en las isotermas entre 0.63 y 0.70 de a_w .
Sorption isotherms and moisture sorption hysteresis of intermediate moisture content banana	Yan et al., 2008	Freundlich modificada	10, 15, 20, 30 y 40	El calor isostérico neto varió desde 0.85 hasta 7.67 kJ g ⁻¹ mol ⁻¹ , disminuyendo con el aumento de contenido de humedad.
Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes	Kaymak et al., 2003	GAB, BET, Hasley	30, 45, 60	Mejor ajuste Hasley. El contenido de humedad en equilibrio se incrementa con el decremento de la temperatura a a_w constante
Isotermas de adsorción y velocidad de rehidratación encálica papaya L. deshidratada con diferentes métodos	Mendoza et al., 1999.	BET, GAB, Henderson, Chen	70	El modelo GAB fue el mejor modelo
Water sorption isotherms and glass transition in strawberries: influence of pretreatment	Moraga et al., 2004	GAB	30	El modelo de GAB tuvo un ajuste apropiado con los datos experimentales
Modelo cinético del secado de la pulpa de mango	Ocampo, 2006	GAB	55, 65	La isoterma de la pulpa de mango se ajusta muy bien a la ecuación de GAB
Elaboración de isotermas de sorción para <i>Phaseolus vulgaris</i> y cálculo de parámetros termodinámicos de sorción	Nava et al., 1999	GAB, BET	4, 25, 30, 35, 40	Mejor modelo GAB. El molido presenta mayores valores de humedad a una a_w que el entero. A menor temperatura mayor contenido de humedad.
Isotermas de desorción de pimientos de padrón (<i>Capsicum annuum</i> lvar. <i>longum</i>)	Chenlo et al., 2005.	GAB, Lewicki y Peleg	5, 25, 45, 65	El mejor modelo fue el de Peleg, el contenido de humedad es igual para el fruto entero o troceado, mayor contenido de humedad a temperaturas más bajas
Determinación de las isotermas de sorción a tres temperaturas en dos variedades de maíz y trigo, su ajuste a modelos matemáticos y el estudio preliminar de las condiciones de almacenamiento	Arana et al., 1988	GAB, BET, Caurie, Oswin, Bradley y Henderson	10, 25, 37	Las isotermas presentan forma sigmoidal. Cuando a una a_w constante se disminuye la temperatura, aumenta el contenido de humedad que está en equilibrio a esa a_w .
Modelado de las isotermas de desorción del ñame (<i>Dioscorea rotundata</i>)	Montes et al., 2008	GAB, BET, Smith, Oswin, Henderson y Peleg	45, 55, 70	No se presentan diferencias en las isotermas a diferentes temperaturas, mejor ajuste es el de Peleg.

Los modelos que se han desarrollado para representar las isothermas de sorción pueden describirse por un planteamiento cinético, como lo utilizaron originalmente Langmuir; Brunauer; Anderson y de Boer, o por formulaciones termodinámico-estadísticas. Fowle dedujo la isoterma de monocapa de Langmuir estadísticamente, una derivación generalizada por Cassie y Hill de la isoterma de BET. Guggenheim utilizó la mecánica estadística para obtener el modelo de GAB. Igualmente, la fundamentación teórica de la isoterma t.s.s. fue deducida a través de la mecánica estadística. Recientemente Timmermann en 2003 presentó una derivación directa de base puramente termodinámica (Zug, 2002).

Debido a la gran importancia de las isothermas de sorción en los alimentos, se pueden encontrar en la literatura abundantes trabajos relacionados con el tema para diferentes alimentos.

En general se encuentra en los resultados obtenidos de los trabajos antecedentes que, cuando se obtienen isothermas de sorción se puede presentar que para diferentes temperaturas en un mismo alimento haya diferencias significativas o no, que alguno de los modelos se ajuste mejor a los datos obtenidos que los demás y que algunos no se ajusten al comportamiento de la curva. También se puede presentar que para la fruta troceada, haya una diferencia en las isothermas que para la misma fruta entera o no hayan diferencias; y por lo general las muestras llegan al equilibrio alrededor del décimo día.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó mediante el método gravimétrico estático, por el cual las muestras se ubicaron en desecadores a humedades relativas constantes (frascos con soluciones salinas), hasta llegar a un equilibrio higroscópico. Para alcanzar esto, se adecuaron diferentes soluciones salinas que tienen la característica de adsorber humedad del ambiente en que se hallen, hasta lograr un estado de equilibrio.

5.1. Materiales

5.1.1. Materia prima

Se utilizaron guayabas (*Psidium guajava L.*) obtenidas en un supermercado ubicado en la zona sur de Santiago de Cali del departamento del Valle del Cauca; con un contenido de sólidos solubles de 8 ± 0.5 °Brix, y una humedad en base húmeda de 78 ± 2 %.

5.1.2. Equipos

- Estufa
- Balanza analítica
- Refractómetro
- Medidor de actividad de agua (Aqualab serie 4TE)
- Frascos (usados como desecadores)

5.2. Métodos

5.2.1. Preparación de las soluciones salinas

Para la adecuación de los ambientes controlados a diferentes humedades relativas se prepararon soluciones saturadas de diferentes sales como se

especifica en la norma ISO 12571:2001; las sales y la cantidad estipulada se muestran en la Tabla 3 junto con su humedad relativa a cada temperatura.

Tabla 3. Sales para la preparación de los ambientes controlados

Sal	g de sal por 100 mL de agua destilada	Humedad relativa a 40°C (%)	Humedad relativa a 55°C (%)	Humedad relativa a 67°C (%)
Hidróxido de potasio	178	6,26 ± 0,35	5,58± 0,28	5,24 ± 0,36
Cloruro de magnesio hexahidratado	367	31,60 ± 0,13	29,93 ± 0,16	28,52 ± 0,20
Nitrato de magnesio hexahidratado	125	48,42 ± 0,37	43,95± 0,60	40,37 ± 0,70
Ioduro de potasio	208	66,09 ± 0,23	63,78 ± 0,28	62,07 ± 0,34
Nitrato de sodio	180	71,00 ± 0,34	68,15 ± 0,49	66,06 ± 0,63
Cloruro de sodio	39.12	74,68 ± 0,13	74,41 ± 0,24	74,42 ± 0,32
Cloruro de potasio	56.70	82,32 ± 0,25	80,70 ± 0,35	79,52 ± 0,45

La preparación de las soluciones se efectuó en agua caliente para aumentar la solubilidad de las sales. Cada cantidad de sal estipulada por la norma ISO 12571:2001 se agregó de manera uniforme y se mantuvo en constante agitación hasta alcanzar la temperatura ambiente, finalmente se midió la actividad de agua a las soluciones para verificar que fuera la estipulada por la norma a cada temperatura.

5.2.2. Preparación de las muestras

Las guayabas se procesaron hasta obtener una pulpa, luego se tomaron muestras de 1 g; a esta pulpa se le midió el contenido de humedad y el contenido de sólidos solubles. Las muestras se pusieron en porta-muestras como se muestra en la Figura 4.

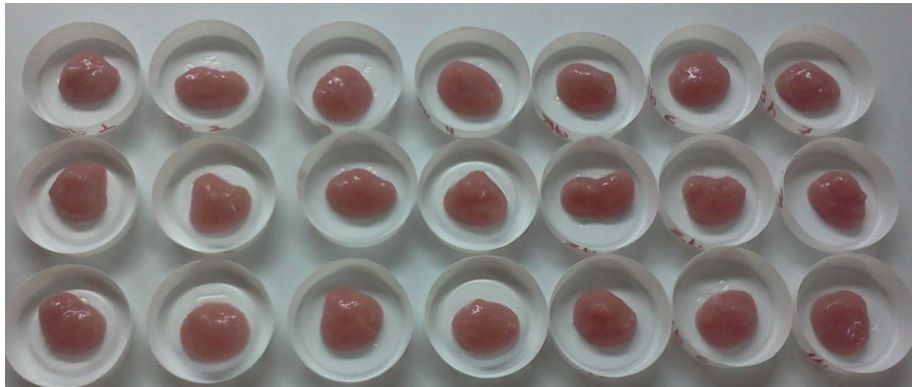


Figura 4. Muestras de pulpa de guayaba

5.2.3. Montaje del experimento

Se prepararon 8 frascos por cada sal, adicionando a cada frasco 33 mL de la solución salina preparada previamente, luego se colocaron las porta-muestras dentro de los frascos sobre los soportes y se cerraron como se observa en las Figuras 5 y 6, y se colocaron en la estufa a 40°C, 55°C o 67°C.



Figura 5. Muestra de pulpa de guayaba en la solución salina

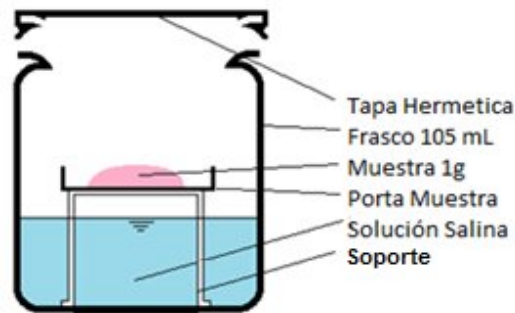


Figura 6. Esquema del montaje del experimento dentro de cada frasco

Los 8 frascos se distribuyeron para las 3 réplicas así: 3 para la primera réplica, 3 para la segunda y 2 para la tercera. La primera réplica se introdujo a la estufa a una temperatura determinada; cada dos horas se sacó el mismo frasco de cada sal y se registró la pérdida de peso. A las 24 horas se introdujo la segunda réplica y se realizó el mismo procedimiento anterior. Pasadas 48 horas después de introducir los primeros frascos a la estufa se introdujo la tercera réplica, en ésta no se hizo control de pérdida de peso, y las muestras se dejaron en la estufa el tiempo promedio que habían estado las anteriores réplicas.

El procedimiento de pérdida de peso se realizó hasta que la diferencia entre los dos últimos pesajes no superó el 1%, esto garantiza que se llegó al equilibrio. Después de llegado al equilibrio se determinó la humedad como lo indica la NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC) 2228 de 1986.

5.2.4. Evaluación de los modelos matemáticos

Los datos obtenidos en el laboratorio se ajustaron a los modelos matemáticos de BET, GAB, PELEG y OSWIN. Para determinar los parámetros de cada modelo se realizó un análisis de regresión no lineal por medio de la herramienta SOLVER del software EXCEL 2007. Mediante un análisis estadístico se definió el modelo que

mejor ajustó los datos experimentales; para realizar este análisis se usó MINITAB 16.0.

Se calculó el error relativo promedio porcentual ($E\%$) y el coeficiente de correlación (R^2) para evaluar el grado de ajuste de los datos obtenidos experimentalmente con cada modelo matemático mediante las ecuaciones (11) y (12).

$$\%E = 100 \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - X_{pi}}{X_i} \right)^2 / n \quad (11)$$

$$R = \frac{\sum X - X}{\sum (X - X)} \quad (12)$$

Donde X_i es el valor de humedad experimental, X_{pi} es el valor de humedad previsto, y n es el número de datos experimentales. El error relativo promedio porcentual es ampliamente utilizado y se considera que $E < 10\%$ es un indicador de una buena aproximación al modelo.

5.2.5. Diseño experimental

Se realizó un diseño experimental de dos factores totalmente aleatorizado. La unidad experimental con la que se realizó el diseño es 1 g de pulpa de guayaba, la variable respuesta es la humedad en el equilibrio de la guayaba y el número de réplicas es 3. En la Tabla 4 se muestra el diseño experimental.

Tabla 4. Diseño experimental

Factor	Nivel
Temperatura, °C	40, 55 y 65
Actividad de agua	7 soluciones salinas

Por medio de unANOVA y analizando el valor F que se obtuvo, para un nivel de significancia del 95%, se evaluó para cada tratamiento el efecto de la temperatura sobre la humedad en equilibrio en la guayaba.

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

6.1. Isotermas de desorción

En la Tabla 5 se presentan los promedios de las humedades de equilibrio de las réplicas de los datos experimentales a las actividades de agua y las tres temperaturas estudiadas.

Tabla 5. Resumen de datos experimentales

Sal	40°C		55°C		67°C	
	a_w	H.b.s. (g/g.s.s.)	a_w	H.b.s. (g/g.s.s.)	a_w	H.b.s. (g/g.s.s.)
Hidróxido de potasio	0.0626	0.0145	0.0558	0.0037	0.0524	0.0009
Cloruro de magnesio hexahidratado	0.3160	0.0802	0.2993	0.0596	0.2852	0.0545
Nitrato de magnesio hexahidratado	0.4842	0.1156	0.4395	0.1122	0.4037	0.1265
Ioduro de potasio	0.6609	0.1825	0.6378	0.1500	0.6207	0.1368
Nitrato de sodio	0.7100	0.2183	0.6815	0.1777	0.6606	0.1584
Cloruro de sodio	0.7468	0.2608	0.7441	0.2449	0.7442	0.2481
Cloruro de potasio	0.8232	0.3875	0.8070	0.3392	0.7952	0.3058

El tiempo en el cual se llegó al equilibrio para una muestra fue distinto tanto para cada actividad de agua como para cada temperatura. A menor actividad de agua de las soluciones menor es el tiempo necesario para llegar al equilibrio, debido a que la diferencia de la función de Gibbs se hace mayor a medida que la actividad de agua es menor, por lo tanto, mayor es la fuerza impulsora que genera el cambio de fase. La diferencia de la función de Gibbs es la fuerza que genera el cambio de fase, del mismo modo que la diferencia de temperatura es la fuerza que genera la transferencia de calor. (Levine, 1996)

A mayor temperatura menor es el tiempo que tarda la muestra en llegar al equilibrio, debido a que la cantidad de humedad que el ambiente es capaz de

retener es proporcional a la presión de saturación, la cual aumenta con la temperatura, por lo tanto la diferencia entre la presión de vapor y la presión de saturación se hace más grande ya que la presión de vapor dentro del ambiente controlado no cambia debido a que está garantizado que la humedad relativa no cambia durante el experimento; esta diferencia entre la presión de vapor y la presión de saturación es la que facilita el escape de las moléculas de agua y este escape es proporcional a esta diferencia (Cengel et al., 2007). El equilibrio para 40°C se alcanza a los 8 días como lo muestra la Figura 7, mientras que para 55 y 67°C se alcanza a los 6 y 4 días, respectivamente como se muestra en las Figuras 8 y 9.

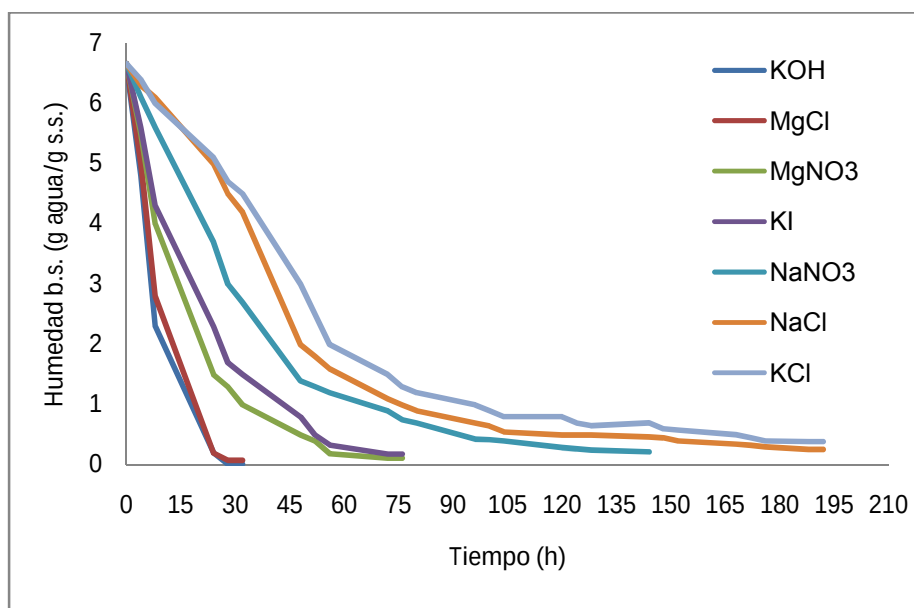


Figura 7.Curvas de pérdida de humedad a 40°C

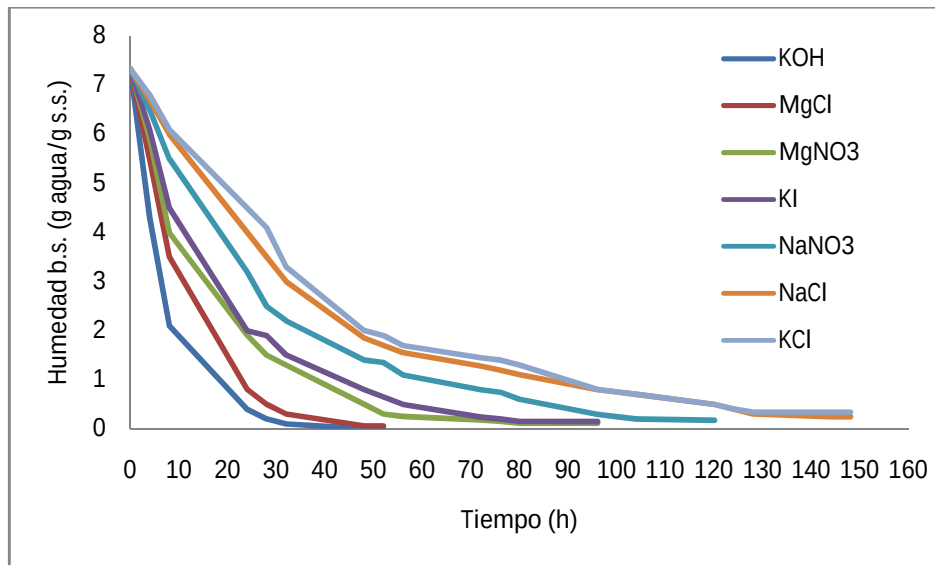


Figura 8. Curvas de pérdida de humedad a 55°C

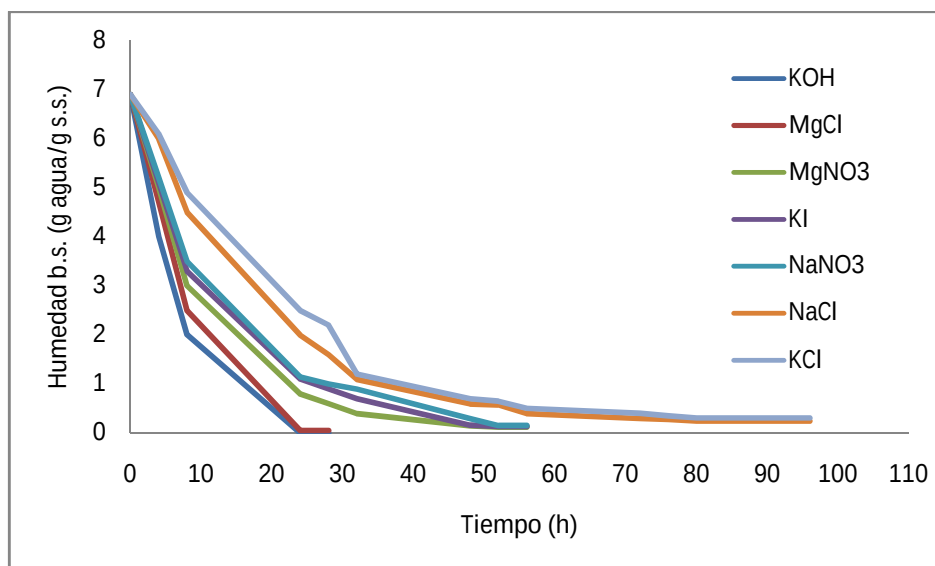


Figura 9. Curvas de pérdida de humedad a 67°C

En la Figura 10 se observan las isotermas de desorción de guayaba a las tres temperaturas estudiadas.

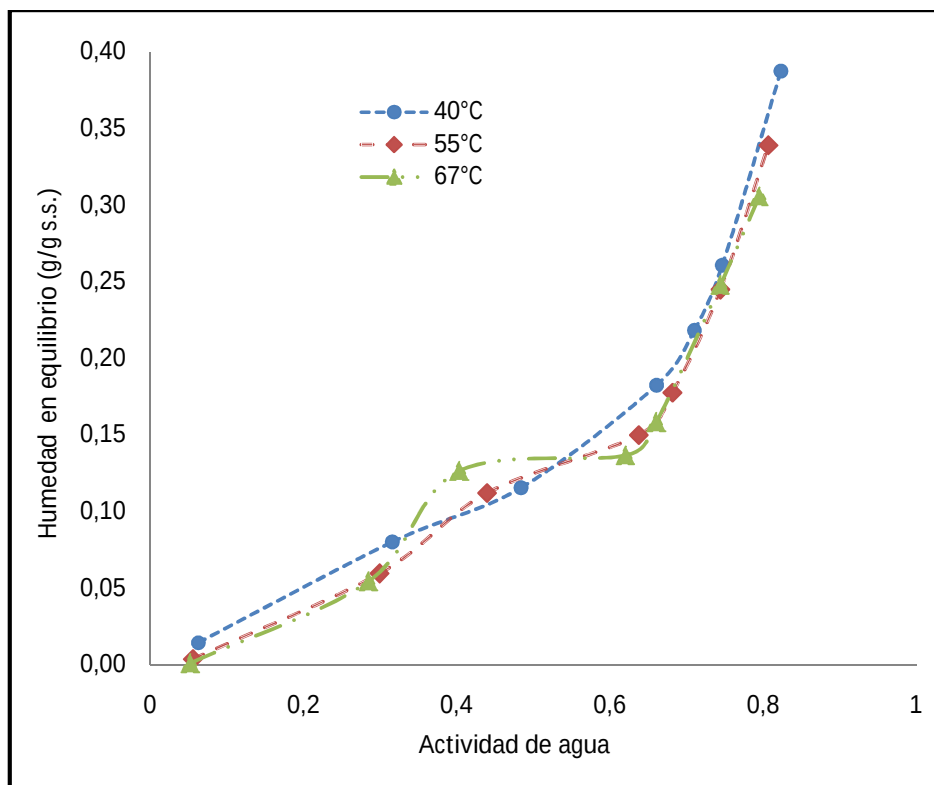


Figura 10. Isotermas de desorción de humedad de guayaba a 40°C, 55°C y 67°C

La isoterma a 40° C es una isoterma tipo 3 y a medida que aumenta la temperatura se observa un cambio en el tipo de la isoterma a tipo 2, según se observa en la descripción de tipos en la Figura 1. Estos tipos de isotermas también se encuentran en otras frutas como: guanábana (Ceballos, 2008), tomate (Akanbi et al, 2006), manzana, pera, pasas (Moreira et al, 2009). Las isotermas mostradas en este estudio muestran curvas típicas de los alimentos donde el contenido de humedad en equilibrio se incrementa con el incremento de la actividad de agua.

En la Figura 10 se observa un entrecruzamiento de las curvas en un rango de actividades de agua entre 0,3 y 0,5 a medida que se incrementa la temperatura, esto sucede en productos con alto contenido de azúcares (Simal et al., 2007), debido a que a medida que se incrementa la temperatura la solubilidad de los azúcares también se incrementa, formándose una disolución que hace que se

creen puentes de hidrógeno entre el azúcar y el agua, aumentando así el contenido de humedad (Audesirk et al., 2004).

6.2. Ajuste a los modelos matemáticos

Los parámetros obtenidos para cada modelo mostrados en la Tabla 6 se hallaron con las ecuaciones 3, 4, 5, y 6, por regresión no lineal. En esta tabla también se muestra el error relativo promedio porcentual E% y el coeficiente de correlación R^2 calculados con las ecuaciones 11 y 12.

Tabla 6. Parámetros y estadística para cada modelo ajustado

Temp.	Modelo	PARÁMETROS				ESTADÍSTICA	
		A	B	C	D	R^2	E%
40°C	OSWIN	0.1143	0.7772	-	-	0.9932	6.55
	BET	0.0718	3.7966	-	-	0.9975	4.97
	GAB	0.0679	4.5983	1.0107	-	0.9981	6.13
	PELEG	0.2226	1.0547	0.9188	8.4985	0.9997	3.81
55°C	OSWIN	0.1053	0.7962	-	-	0.9818	8.10
	BET	0.0679	3.9205	-	-	0.9871	5.81
	GAB	0.0599	5.7570	1.0272	-	0.9886	5.38
	PELEG	0.2380	1.5446	1.0712	10.8110	0.9939	5.05
67°C	OSWIN	0.1110	0.7272	-	-	0.9534	10.51
	BET	0.0648	5.7522	-	-	0.9608	10.82
	GAB	0.0616	6.6015	1.0130	-	0.9610	10.42
	PELEG	0.2225	1.5363	0.9442	10.7232	0.9714	10.67

Basados en el coeficiente de correlación el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales para las tres temperaturas es PELEG. A medida que aumenta la temperatura el error relativo promedio porcentual aumenta y el coeficiente de correlación disminuye, debido a que los modelos matemáticos están diseñados para ajustar isothermas tipo 3 y los datos experimentales tienen la tendencia a cambiar de tipo 3 a tipo 2 a medida que aumenta la temperatura. El error relativo promedio porcentual (E%) fue aproximado a 10, lo que indica que los modelos se ajustan de manera adecuada a los datos experimentales.

En las Figuras 11, 12 y 13 se representan gráficamente el ajuste de los modelos a los datos experimentales a las 3 temperaturas.

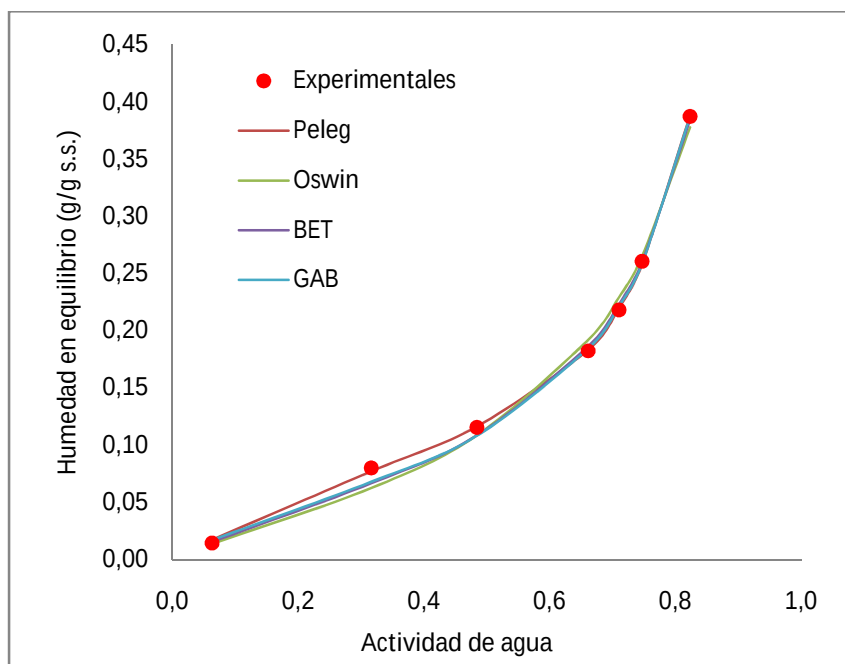


Figura 11. Ajuste de los modelos a los datos experimentales a 40°C

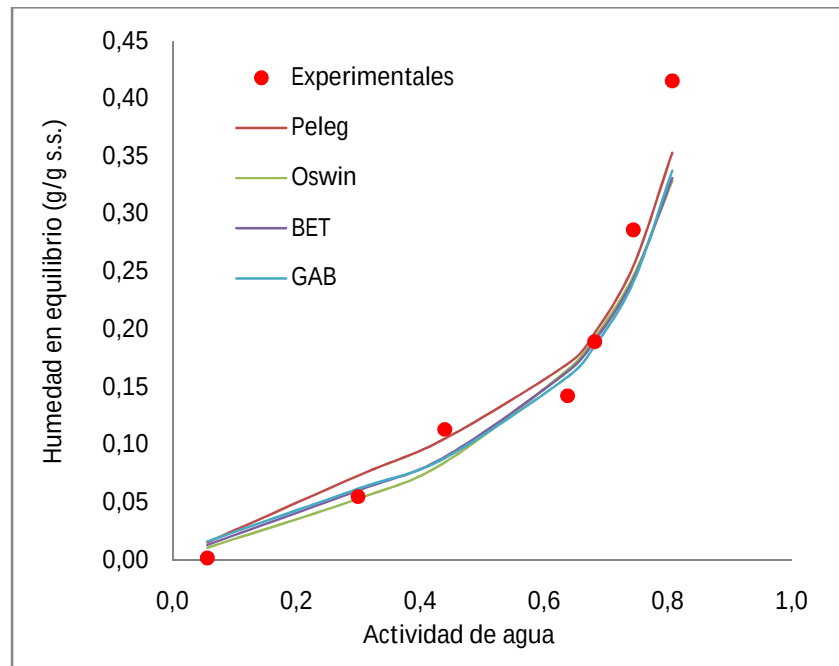


Figura 12. Ajuste de los modelos a los datos experimentales a 55°C

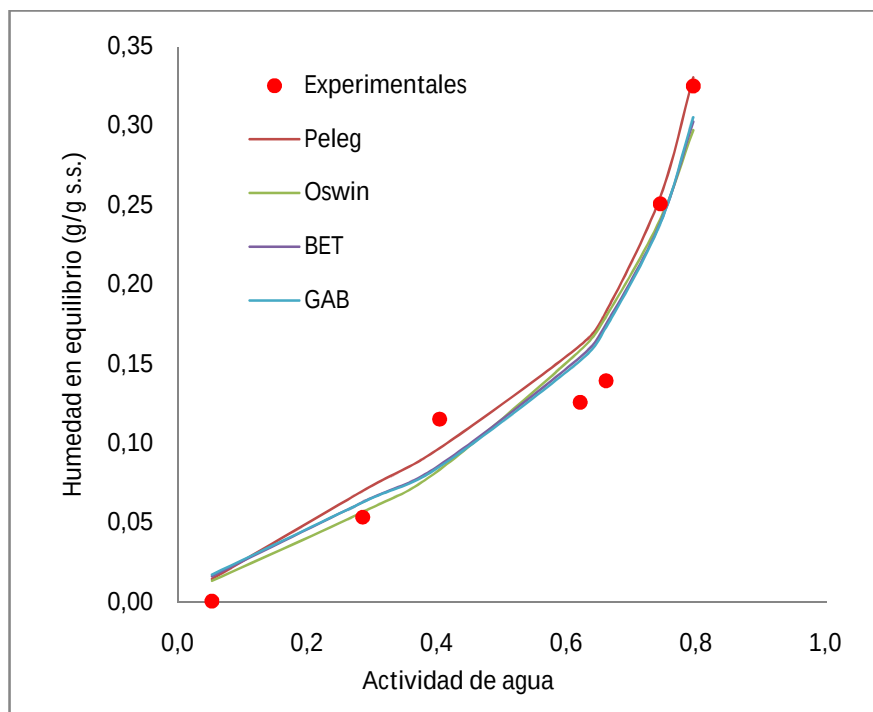


Figura 13. Ajuste de los modelos a los datos experimentales a 67°C

En la Figura 11 se puede observar mejor ajuste de los modelos a los datos experimentales que en las Figuras 12 y 13, debido a que los datos experimentales tienden a formar isothermas tipo 2 a medida que aumenta la temperatura.

En la Figura 14 se presentan las isothermas ajustadas con el modelo que mostró mejor ajuste a las tres temperaturas.

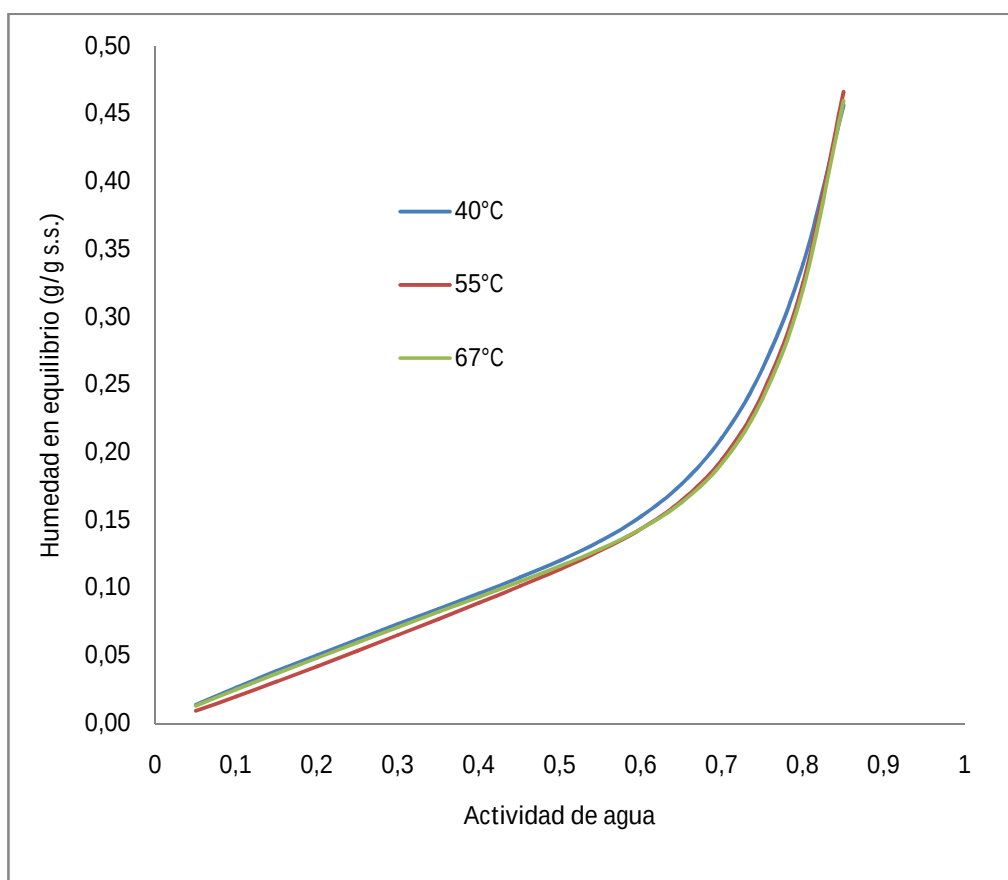


Figura 14. Isothermas de desorción modeladas con PELEG

Gráficamente en la Figura 14 las isothermas no son disimiles en cuanto a forma y se comportan de manera semejante en casi todo el rango de actividad de agua.

6.3. Comparación entre las isothermas modeladas que mejor se ajustaron a las tres temperaturas

Se empleó una comparación entre los residuos que las tres isothermas mejor ajustadas dejan contra los datos experimentales de una temperatura, si los residuos de las isothermas tienen la misma media y desviación estándar, entonces, las tres isothermas describen a los datos experimentales de la temperatura evaluada.

Mediante unANOVA simple, donde la hipótesis es: son iguales las medias de los residuos que dejan las isothermas mejor ajustadas contra los datos experimentales de una temperatura. La Tabla 7 muestra los residuos que dejan las isothermas.

Tabla 7. Diferencia entre las isothermas mejor ajustadas y los datos experimentales

Temp.	Residuos de las isothermas mejor ajustadas								
	40 °C			55 °C			67 °C		
40°C	-0.0053	-0.0021	-0.0013	0.0002	0.0034	0.0042	-0.0041	-0.0009	-0.0001
	0.0040	-0.0029	0.0076	0.0127	0.0058	0.0162	0.0063	-0.0006	0.0098
	0.0177	-0.0138	-0.0066	0.0247	-0.0068	0.0004	0.0212	-0.0101	-0.0030
	-0.0058	-0.0087	0.0119	0.0074	0.0045	0.0252	0.0089	0.0060	0.0267
	-0.0009	-0.0123	0.0084	0.0160	0.0045	0.0252	0.0189	0.0075	0.0282
	0-0072	-0.0121	0.0120	0.0256	0.0063	0.0304	0.0296	0.0103	0.0344
	-0.0046	0.0245	-0.0212	0.0018	0.0310	-0.0148	0.0074	0.0366	-0.0092
55°C	-0,0137	-0.0085	-0.0138	-0,0085	-0.0033	-0.0086	-0,0126	-0.0074	-0.0126
	-0,0305	0.0070	-0.0183	-0,0217	0.0158	-0.0096	-0,0282	0.0093	-0.0161
	-0,0094	0.0214	0.0079	-0,0021	0.0286	0.0152	-0,0065	0.0243	0.0108
	-0,0331	-0.0001	-0.0277	-0,0215	0.0115	-0.0161	-0,0207	0.0123	-0.0153
	-0,0462	-0.0042	-0.0075	-0,0314	0.0106	0.0073	-0,0293	0.0127	0.0094
	-0,0258	-0.0363	0.0313	-0,0074	-0.0180	0.0497	-0,0035	-0.0141	0.0536
	-0.0500	-0.0546	0.0624	-0.0379	-0.0425	0.0745	-0.0326	-0.0372	0.0798
67°C	-0,0136	-0,0141	-0,0139	-0,0086	-0,0091	-0,0090	-0,0125	-0,0130	-0,0129
	-0,0118	-0,0193	-0,0165	-0,0029	-0,0104	-0,0076	-0,0096	-0,0170	-0,0142
	0,0369	0,0327	0,0184	0,0446	0,0404	0,0260	0,0395	0,0353	0,0210
	-0,0184	-0,0212	-0,0359	-0,0079	-0,0107	-0,0254	-0,0075	-0,0104	-0,0250
	0,0121	-0,0428	-0,0436	0,0252	-0,0296	-0,0304	0,0267	-0,0281	-0,0289
	-0,0215	0,0039	-0,0041	-0,0031	0,0223	0,0142	0,0008	0,0262	0,0181
	-0.0462	-0.0231	-0.0054	-0.0314	-0.0083	0.0094	-0.0263	-0.0033	0.0145

La comparación de los residuos de las isothermas mejor ajustadas contra los datos experimentales de 40, 55 y 67°C se muestran en las Tablas 8, 9 y 10 mediante Anova y prueba de Tukey.

Tabla 8.Anova y prueba de Tukey para 40°C

Anova		Tukey		
P	T °C	Media	Desviación	Agrupación
0,148	40	-0,00021	0,01129	A
	55	-0,01177	0,02811	A
	67	-0,01188	0,02275	A

Tabla 9. Anova y prueba de Tukey para 55°C

Anova		Tukey		
P	T °C	Media	Desviación	Agrupación
0,161	40	0,01067	0,01260	A
	55	-0,00074	0,02798	A
	67	-0,00058	0,02215	A

Tabla 10.Anova y prueba de Tukey para 67°C

Anova		Tukey		
P	T °C	Media	Desviación	Agrupación
0,143	40	0,01066	0,01416	A
	55	-0,00114	0,02832	A
	67	-0,00127	0,02162	A

El valor de P que se muestra en la Tablas 8, 9 y 10 indican que no hay diferencias significativas entre los residuos de las temperaturas ya que P es mayor a 0.05 en todos los casos, y que el modelo de Peleg ajustado a cada temperatura es ajustable a los datos experimentales de las otras dos temperaturas, esto se corrobora con la agrupación que Minitab 16 realiza al resolver Tukey. Las temperaturas que comparten una letra no son significativamente diferentes.

Los resultados de las pruebas de Tukey, en un nivel de confianza del 95% para las comparaciones de las isothermas mejor ajustadas y los datos experimentales, sugieren que no existen diferencias significativas entre las isothermas mejor ajustadas y los datos experimentales, por lo tanto no existen diferencias significativas para las isothermas de guayaba a temperaturas de 40°C, 55°C y 67°C.

6.4. Calor isostérico

El calor isostérico de desorción, determinado con la ecuación (9) utilizando los datos de sorción de humedad en equilibrio expresados por los modelos que mejor describen las isothermas, se presentan en función de la humedad en equilibrio en la Figura 15.

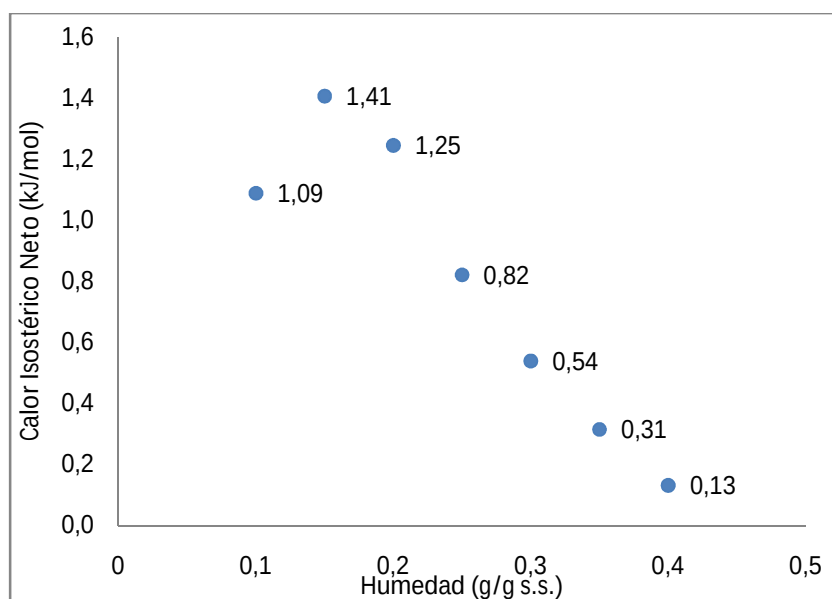


Figura 15. Variación del calor isostérico de desorción con el contenido de humedad en equilibrio

El calor isostérico se incrementa a un máximo y luego decrece con el incremento del contenido de humedad en equilibrio. El calor isostérico de desorción máximo (1,2 y 1,5 kJ/mol) se obtuvo en el rango de contenido de humedad de 0,1 – 0,2

g/g.s.s. El valor de entalpía máxima indica la cobertura de los sitios de unión más fuertes y la mayor interacción agua-sólidos. El calor isostérico de desorción decrece con el incremento de contenido de humedad a partir de 0,15 g/g s.s., esto confirma el hecho de que a altos niveles de humedad, la fuerza de los enlaces de agua disminuye (Togrul et al, 2007). El calor isostérico de sorción es ligeramente mayor que el calor latente de vaporización, esto se puede deducir ya que en la Figura 12 no se observan valores negativos del calor isostérico neto. Este tipo de comportamiento en el calor isostérico se encontró en tomate (Togrul et al, 2007) y guanábana (Ceballos, 2008).

La Figura 16 muestra claramente un descenso en el calor isostérico neto a medida que se aumenta la humedad en equilibrio acercándose a valores de cero, lo que significa que a altos contenidos de humedad el calor diferencial de desorción se iguala al calor latente de vaporización.

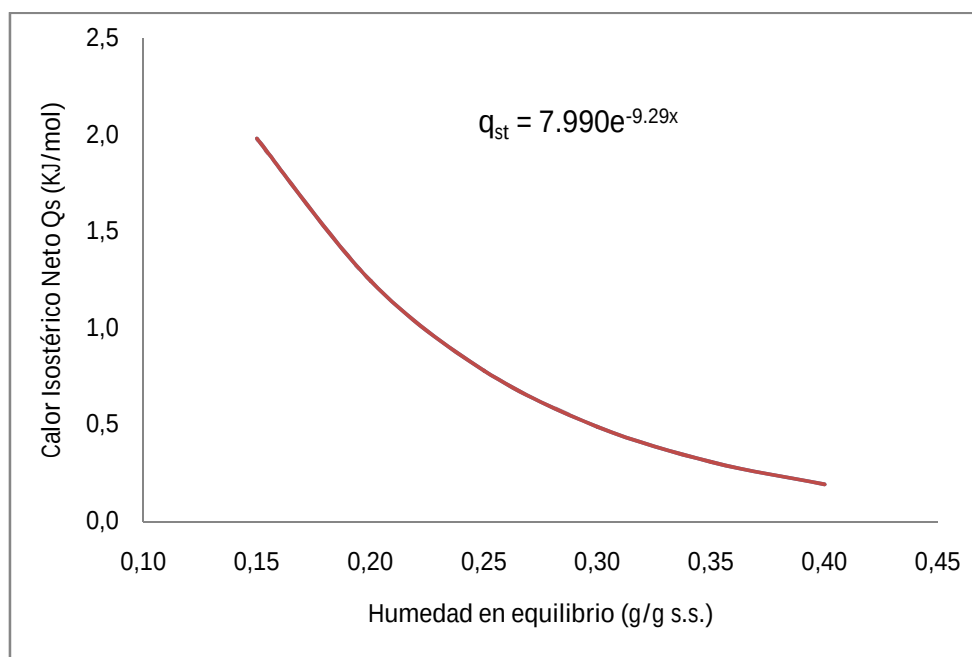


Figura 16. Variación del calor isostérico de desorción con el contenido de humedad de guayaba modelado por la ecuación de Tsami

La Figura 16 es válida para valores de humedad superiores a 0,2 g/g s.s. El efecto del contenido de humedad sobre el calor isostérico neto fue ajustado por la ecuación 13 con un coeficiente de correlación R^2 de 0.9914:

$$q = 7,99 e^{-X_0} \quad (13)$$

Donde de acuerdo con la ecuación 10, q_0 es 7,99 kJ/mol y X_0 es 0,1076 g/g s.s.

CONCLUSIONES

Se obtuvieron las isotermas de desorción de la guayaba mediante el método gravimétrico estático para temperaturas de 40°C, 55°C y 67°C a un amplio rango de actividad de agua, en donde a medida que aumenta la actividad de agua, aumenta el contenido de humedad en equilibrio. El tiempo máximo en el que una muestra alcanzó el equilibrio fue de 8 días. En general, los valores de humedad en equilibrio variaron entre 0 y 0,4 g/g s.s. para las tres temperaturas. El tipo de las isotermas de desorción de la guayaba cambia ligeramente con el aumento de temperatura de ser tipo 3 a ser tipo 2 en el rango de temperaturas experimentadas. Se encontró entrecruzamiento en el rango de actividad de agua entre 0,3 y 0,5.

Se estableció que los datos experimentales se ajustaron con un alto coeficiente de correlación y un porcentaje de error relativo bajo ($R^2 > 0,95$ y $E\% < 10\%$) con los modelos de BET, GAB, Peleg y Oswin, siendo el de mejor ajuste el modelo de Peleg en todos los casos y el de menor ajuste el modelo de Oswin en todos los casos.

El ANOVA mostró que para ninguna actividad de agua existen diferencias significativas en el contenido de humedad en equilibrio a las temperaturas experimentadas con un nivel confianza del 95%.

Mediante una relación lineal se encontró la dependencia del calor isostérico de desorción con el contenido de humedad en equilibrio, a medida que se disminuye el contenido de humedad se incrementa el calor isostérico neto de desorción teniendo un máximo en el rango de contenido de humedad entre el 0,1 – 0,2 g/g s.s. y entre 1,2 y 1,5 kJ/mol. El calor isostérico de desorción de la monocapa fue de 7,99 kJ/mol.

REFERENCIAS

AKANBI, C.; R. SIKIRU; A. OJO. 2006. Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *Journal of Food Engineering* 73: 157–163.

ARANA, E. R.; G. A. ITURBE. 1988. Determinación de las isothermas de sorción a tres temperaturas en dos variedades de trigo, su ajuste a modelos matemáticos y el estudio preliminar de las condiciones de almacenamiento. *Tec. Aliment. (Méx)* 24(1): 4-13.

AUDESIRK, T.; G. AUDESIRK; B. BYERS. 2004. *Biología Ciencia y Naturaleza*. México, Pearson Educación. pp 38.

BARAONA, M.C.; E. SANCHO. 1992. *Coco, Pejibaye, Guayaba y Cas*, Fruticultura especial, fascículo 4. San José, Costa Rica, Editorial Universidad estatal a distancia. 120 páginas.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; H. VEGA. 1996. *Dehydration of Foods*. New York, Chapman and Hall. pp 70-71.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. 2007. *Water activity in foods: fundamentals and applications*. Washington, Jhon Wiley and sons. pp 140.

BRUNAUER, S.; P. H. EMMETT; E. TELLER. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.* 60, 309-19.

CASP, A.; J. ABRIL. 1999. *Procesos de conservación de alimentos*. Madrid, Ediciones Mundi-prensa. pp. 327-331.

CEBALLOS, A. 2008. Estudio comparativo de tres sistemas de secado para la producción de un polvo deshidratado de fruta. Tesis Mag. Ing. Manizales. Universidad Nacional de Colombia. Fac. Ing. 111 p.

CEBALLOS, A.; G. GIRALDO; C. ORREGO. 2009. Evaluation of various models of water adsorption isotherms of a dried fruit powder. Vector 4: 107-116.

CENGEL, Y.; M. BOEL. 2007. Termodinámica. 5 ed. México, McGraw-Hill, pp 808.

CHENLO, F.; R. MOREIRA; L. CHAGURI; F. SANTOS. 2005. Isotermas de desorción de pimientos de padrón (*Capsicum annuum* L. Var. Longum). Cien. Tecnol. Aliment. 5(1): 18-24.

CONDON, J. B. 2006. Surface area and porosity determinations by physisorption: measurements and theory. Ediciones Elsevier. pp 274.

DAPV (Colombia). 1994. Plan de desarrollo agropecuario y agroindustrial para el norte del Valle del Cauca. S. E. Cali. 240 páginas.

FENNEMA, O. R. 1996. Química de los Alimentos. Segunda edición. Michigan, Editorial Acribia S. A. 1258 páginas.

FOX, P. F. 1997. Advanced Dairy Chemistry, Lactose, water, salts and vitamins. Second edition. London, Chapman y Hall. pp 310. Volumen 3.

IBARZ, A.; G. BARBOSA. 2005. Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Madrid, Ediciones mundi-prensa. pp 583.

ISO 12571:2001

KAYMAK-ERTEKIN, F.; A. GEDIK. 2003. Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 37(4): 429-438.

KOLASINSKI, K. W. 2008. *Surface Science, Foundations of Catalysis and Nanoscience*. Segunda edición. England, Wiley Editorial. pp 236-237.

LENINGER, H. A. 1975. *Food Process Engineering*. Netherland, Reidel Publishing Company.

LEVINE, I. N. 1996. *Fisicoquímica*. Cuarta edición. Madrid, McGraw-Hill.

MARTÍNEZ, N. 1998. *Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno*. Valencia, Reproval S.A.

MEDINA, B.; F. PAGANO. 2003. Caracterización de la pulpa de guayaba (*Psidium guajava* L.) tipo "criolla roja". *Rev. Fac. Agron.* 20: 72-86.

MENDOZA, R.; R. AURAS; M. E. SCHMALKO; A. R. LINARES. 1999. Adsorption isotherms and rehydration rate in *Carica papaya* L. fruit dehydrated by several methods. *Información Tecnológica*. 10(6): 57-62.

MONTES, E.; R. TORRES; R. ANDRADE; O. PÉREZ; J. MARIMON; I. MEZA. 2008. Modelado de las isothermas de desorción de Ñame (*Dioscorea rotundata*). *Dyna*. 76(157): 145-152.

MORAGA, G.; N. MARTÍNEZ; A. CHIRALT. 2004. Water sorption isotherms and glass transition in strawberries: influence of pretreatment. *Journal of Food Engineering* 62: 315-321.

MOREIRA, R.; F. CHENLO; M.D. TORRES. 2009. Simplified algorithm for the prediction of water sorption isotherms of fruits, vegetables and legumes based upon chemical composition. *Journal of Food Engineering* 94: 334–343.

MURILLO, O. M. N/A. Ficha técnica industrialización de la guayaba (*Psidium guajava* L.). Costa Rica, CNP.

NAVA, D.; M. T. CRUZ; I. ANAYA. 1999. Elaboración de isothermas de sorción para *Phaseolus vulgaris* y cálculo de parámetros termodinámicos de sorción. México, D. F. (Disponible en: http://www.smbb.com.mx/congresos%20smbb/veracruz01/XIII_cienciaytecdealimentos.html Consultado el: 10 de abril de 2010).

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC) 2228 de 1986

OCAMPO, A. 2006. Modelo cinético del secado de la pulpa de mango. *Revista EIA* 5: 119-128.

RAMÍREZ, D.; W. DE SOUZA; L. RAMÍREZ; E. FREITAS. 2009. Propriedades termodinâmicas de adsorção de água do amido de rizomas do lírio-do-brejo (*Hedychium coronarium*). *Ciênc. Tecnol. Aliment.* 29(2): 454-462.

RIVERA, I. P.; C. TORRES. 1997. Plan estratégico para la agroindustria de la guayaba en Bolívar (Valle). Tesis Esp. Cali, Universidad del Valle, Fac. Ing. 64 p.

ROCKLAND, L. B.; L. BEUCHAT. 1987. Water activity: theory and applications to food. CRC Press. 404 páginas.

SAHIN, S.; S. GULUM. 2006. Physical properties of foods. United States of America, Springer. pp 257.

SIMAL, S.;A. FEMENIA;A. CASTELL-PALOU; C. ROSSELLO. 2007. Water desorption thermodynamic properties of pineapple. Journal of Food Engineering, 80, 1293-1301.

TIMMERMANN, E.O. 2003. Termodinámica de isothermas de sorción.La Plata, Argentina.pp 23.

TOGRUL, H.; N. ARSLAN. 2007. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of walnut kernels. Journal of Stored Products Research 43: 252–264.

TSAMI, E.; Z. B. MAROULIS; D. MARINOS-LOURIS; G. D. SARAVACOS. 1990. Heat of sorption of water in dried foods. International Journal of Food Science and Technology, 25, 350–359.

URIBE, A. F. 1998. Principales avances en investigación y desarrollo tecnológico por sistemas de producción agrícola. Santa Fé de Bogotá, D.C., CORPOICA. P 208-214

YAN, Z.; M. SOUSA-GALLAGHER; F. OLIVEIRA. 2008. Sorption isotherms and moisture sorption hysteresis of intermediate moisture content banana.Journal of FoodEngineering 86: 342-348.

ZUG, J. P. 2002. Fisicoquímica especial. Isotherma de adsorción de tres etapas y modelos de sorción restringida. Monografía N° 6. Ed. Facultad de Ingeniería. Argentina, Universidad de Buenos Aires. p 61.