

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD EXPERIMENTAL DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA



**DETERMINACIÓN DE ISOTERMAS DE SORCIÓN DE
HUMEDAD EN HARINA PRECOCIDA DE TOPOCHO VERDE
(ABB) “PELIPITA” (*Musa acunimata* x *Musa balbisiana*)**

**Trabajo Especial de Grado para optar al Título de Licenciado en
Química**

Tutor: Msc. Miguel A. Torrealba P. Autor: Br. Lyumer G. Chávez La C.
Tutor: Dr. Miguel A. Luis L.

Valencia, Junio de 2011.

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

**DETERMINACIÓN DE ISOTERMAS DE SORCIÓN DE HUMEDAD EN
HARINA PRECOCIDA DE TOPOCHO VERDE (ABB) “PELIPITA” (*Musa
acunimata x Musa balbisiana*)**

AUTOR: Br. LYUMER G. CHÁVEZ LA C.
TUTOR: Msc. MIGUEL A. TORREALBA P.
TUTOR: Dr. MIGUEL A. LUIS L.

RESUMEN

Las musáceas en general son vegetales que ofrecen un alto contenido nutricional en fibras y proteínas, el topocho verde en particular al ser deshidratado aumenta su contenido nutricional considerablemente, de este hecho radica la importancia de la aplicación de este tipo de tecnología a los alimentos. En la presente investigación se determinaron las isotermas de sorción de humedad de harina precocida de topocho verde (ABB) “pelipita” (*Musa acunimata x Musa balbisiana*) evaluándolas a 25, 30, 35 y 40°C, en un rango de actividad de agua de 0,202 a 0,835. Los datos experimentales obtenidos se ajustaron a las ecuaciones de adsorción de BET (Brunauer-Emmet-Teller, 1938), GAB (Guggenheim-Anderson-Boer, 1984), Ratti *et al.* (1989) y Chung y Pfoest (1967), mediante un modelo de regresión no lineal y el coeficiente de determinación R^2 del programa “Stata” versión 10, de los modelos evaluados el de Ratti *et al.* (1989) y Chung y Pfoest (1967), fueron los que obtuvieron el mejor valor de coeficiente de determinación con 0,995 y 0,993 en el modelo de Ratti *et al.* (1989) 0,991 y 0,988. Con los modelos de BET (Brunauer-Emmet-Teller, 1938) y GAB (Guggenheim-Anderson-Boer, 1984) se obtuvo el valor de la monocapa con mejores resultados para el modelo de BET cuyos valores se ubicaron entre 0,0136 y 0,0011 g de agua/g de sólido, demostrando que a valores de baja actividad de agua las harinas ceden mayor humedad al medio.

Palabras claves: Harina precocida, actividad de agua, humedad de equilibrio e isotermas de sorción.

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
SCIENCES AND TECHNOLOGY FACULTY
CHEMISTRY DEPARTMENT

ISOTHERMAS DECISION OF HUMIDITY SORCIÓN IN PRECOOKED FLOUR OF GREEN PLANTAIN (ABB) "PELIPITA" (*Muse acunimata* x *Muse balbisiana*).

AUTHOR: Br. LYUMER G. CHÁVEZ LA C.

TUTORS: Msc. MIGUEL A. TORREALBA P. and Dr. MIGUEL A. LUIS L.

SUMARY

The musáceas in general are vegetables that offer a high levels of nutritious fibers and proteins, the green plantain upon being dehydrated enlarges its content in fibers considerably, enlarging its nutritious value. In the present investigation the isothermas were determined of absorption of humidity of the pre-cooked flour of green plantain (in Spanish ABB) "pelipita" (*Muse acunimata* x *Muse balbisiana*) evaluating them to 25, 30, 35 and 40 °C, in a water activity rank from 0.202 to 0.835. The experimental data obtained were adjusted to the equations of adsorption of BET (Brunauer-Emmet-Teller, 1938), GAB (Guggenheim-Anderson-Boer, 1984), Ratti et al. (1989) and Chung and Pfoest (1967), by means of a model of not lineal regression using a decision coefficient (R^2) on software "Stata" version 10, from the evaluated models the Ratti et al (1989) and Chung and Pfoest (1967) achieved the best decision coefficient value 0.995 and 0.993 for Ratti's model, and for Chung and Pfoest 0.991 and 0.988. Using BET and GAB models, the best monocapa values were acquired for BET model, whose values were located between 0.0136 and 0.0011 g of water/g of solid, showing that flours yield greater humidity in low water activity, extending its useful life.

Keywords: Pre-cooked flour, water activity, humidity of equilibrium and isothermas of sorción.

DEDICATORIA

A mi mamá Emiledy por apoyarme siempre en todo momento de mi existencia.

A mi niño Daniel Antonio por entender las ausencias de su madre, por dedicarse a estudiar.

A mi amado esposo Maurizio por ser mi mejor amigo y mi soporte en los momentos difíciles.

A mis hermanos Germán y Gerardo por comprenderme y alentarme.

A mis demás familiares por estar siempre presentes.

A mis queridas amigas Marlyn, Karolina, Rafsil, Arianna, Keyla, Rosa, Dorma y Adarelys por ser las mejores amigas del mundo.

A mis amigos Dave, Pedro, Armando, Abel, Ransey, Dionathan por ser tan especiales conmigo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso por guiarme siempre en mis estudios, y poder realizar este trabajo.

A mi familia por apoyarme y ofrecerme siempre su ayuda para lograr mis metas académicas.

Al Ingeniero MSc. Miguel Ángel Torrealba, por ofrecerme siempre su ayuda tutorial y abrirme las puertas para lograr realizar esta investigación.

Al Dr. Miguel Ángel Luis, por brindarme en todo momento su asesoría académica su cooperación en el desarrollo de este trabajo.

Al Ingeniero MSc. Wilmer Salazar por brindarme su apoyo durante el desarrollo de los experimentos.

Al Dr. Freddy Ocanto por su gran colaboración, orientación y participación indispensables para la realización de este trabajo.

A la Lic. Ruht Álvarez por contribuir en la obtención de las sales para el estudio experimental de la harina precocida de topocho verde.

Al la Ing. Ángela Romero por su colaboración para desarrollar la parte experimental y permitirme obtener el análisis fisicoquímico de la harina en el Laboratorio ALG.

A la UNELEZ, por permitirme realizar este trabajo en sus instalaciones.

A la Universidad de Carabobo, por asentirme como estudiante durante estos años.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE DE CUADROS.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ii
INTRODUCCIÓN.....	1
 CAPÍTULO I: El problema.....	 4
Planteamiento del problema.....	4
Justificación.....	6
Alcances y limitaciones de la investigación.....	8
Objetivos de la investigación.....	9
 CAPÍTULO II: Marco teórico.....	 11
Antecedentes de la investigación.....	11
Revisión bibliográfica.....	17
Generalidades sobre las musáceas.....	17
Subespecies de musas.....	18
El clon “Pelipita” ABB (<i>Musa acuminata</i> x <i>Musa</i> <i>balbisiana</i>).....	20
Composición química general de las musáceas.....	22
Comercialización de los cultivos de bananos en general.....	24

	Pág.
Actividad de agua en los alimentos.....	30
Fenómeno de sorción de humedad.....	37
Isotermas de sorción.....	38
Modelos de equilibrio higroscópico.....	43
Métodos experimentales para determinar el equilibrio higroscópico.....	54
 CAPÍTULO III: Marco metodológico.....	 57
Elaboración de harina de topocho (ABB) verde “pelipita” (<i>Musa acuminata x Musa balbisiana</i>).....	 58
Análisis físico-químico d la harina de topocho verde.....	60
Determinación de isotermas de sorción.....	61
Diseño Estadístico.....	64
Ajuste de los datos experimentales a las ecuaciones a utilizar....	64
 CAPÍTULO IV: Discusión de resultados.....	 66
Análisis nutricional de la harina precocida de topocho verde “pelipita”.....	 66
Análisis estadístico de los datos experimentales.....	67
Análisis de regresión no lineal aplicado a los datos de sorción de humedad.....	 69
Determinación del valor de la monocapa.....	85
 CONCLUSIONES.....	 87
 RECOMENDACIONES.....	 89
 BIBLIOGRAFÍA.....	 91

ANEXOS.....	102
-------------	-----

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro N°	Pág.
1 Material digerible del banano (1973).....	23
2 Composición de la pulpa del banano (1973).....	24
3 Análisis a realizar a la harina de topocho verde (2006).....	60
4 Sales para formar soluciones salinas y su actividad acuosa respectiva (2006).....	61
5 Análisis bromatológico de la harina de topocho verde (ABB) “Pelipita”.....	66
6 Análisis estadístico de los datos experimentales.....	68
7 Análisis de varianza de los datos experimentales.....	68
8 Parámetros para la ecuación de Chung y Pfof (1967), para las isotermas de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a diferentes temperaturas.....	70
9 Parámetros para la ecuación de Ratti (1989), para las isotermas de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a diferentes temperaturas.....	74
10 Parámetros para la ecuación de GAB (1984), para las isotermas de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a diferentes temperaturas.....	78

11	Parámetros para la ecuación de BET (1938), para las isothermas de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a diferentes temperaturas.....	82
12	Cantidad de agua en la monocapa (m_1 o m_0), y a_w crítica de la harina precocida de plátano verde a diferentes temperaturas, empleando las ecuaciones de GAB (1984) y BET (1938).....	85
13	Datos experimentales de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a la temperatura de 25°C.....	104
14	Datos experimentales de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a la temperatura de 30°C.....	105
15	Datos experimentales de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a la temperatura de 35°C.....	106
16	Datos experimentales de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a la temperatura de 25°C.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1 Topocho (ABB) verde “Pelipita” (<i>Musa acuminata</i> x <i>Musa-balbisiana</i>), (2006).....	21
2 Hoja de banano afectada con la Sigatoka Negra, (2006).....	22
3 Principales países exportadores de plátanos en América Latina (2002).....	27
4 Rendimiento de los principales países exportadores de plátanos en América Latina (2002).....	28
5 Principales países importadores de plátanos a nivel mundial (2002)...	29
6 Representación esquemática de la actividad del agua en un alimento en función del contenido de humedad (1986).....	35
7 Representación del contenido de humedad de un alimento en función de la humedad relativa (2004).....	41
8 Clasificación de las isotermas de adsorción (2007).....	42
9 Descortezado del plátano verde (2009).....	58
10 Diagrama de flujo para la producción de harina (2006).....	59
11 Metodología para preparar las sistemas de adsorción de humedad de la harina (2006).....	62

12	Equipo experimental para la determinación de las isothermas de sorción en la muestra de harina (2006).....	63
13	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Chung y Pfof (1967), a 25 °C.....	71
14	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Chung y Pfof (1967), a 30 °C.....	72
15	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Chung y Pfof (1967), a 35 °C.....	72
16	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Chung y Pfof (1967), a 40 °C.....	73
17	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Ratti (1989), a 25 °C.....	75
18	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Ratti (1989), a 30 °C.....	76
19	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Ratti (1989), a 35 °C.....	76

20	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Ratti (1989), a 40 °C.....	77
21	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de GAB (1984), a 25 °C.....	79
22	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de GAB (1984), a 30 °C.....	79
23	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de GAB (1984), a 35 °C.....	80
24	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de GAB (1984), a 25 °C.....	80
25	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de BET (1938), a 25 °C.....	82
26	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de BET (1938), a 30 °C.....	83
27	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de BET (1938), a 35 °C.....	83

28	Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de BET (1938), a 40°C.....	84
29	Variaciones de la monocapa de los datos de sorción de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita”	86

INTRODUCCIÓN

El género *Musa* ha adquirido gran importancia en la alimentación mundial. Los estudios de su origen indomalayo aportados por Kart en 1865 (Angarita y Perea, 1998), han demostrado que todos los plátanos y bananos comestibles se derivan principalmente de dos especies silvestres: *Musa acuminata* y *Musa balbisiana*. Actualmente los sistemas de clasificación de las musáceas se basan en los trabajos de Shepard y Simmonds (1956), quienes establecieron las clasificaciones para identificar los aportes genómicos provenientes de las especies *M. acuminata* (genoma A) y *M. balbisiana* (genoma B).

El topocho (ABB) “pelipita” (*Musa acunimata* X *Musa balbisiana*) es un vegetal ampliamente utilizado en gran parte del mundo tanto para consumo humano como para alimentación animal, así mismo se le considera de gran importancia en la dieta de la población del centro y sur de América. Desde el punto de vista culinario se considera más una verdura que una fruta y es parte fundamental en decenas de diferentes platillos tanto verde como maduro (Consejo Nacional de Producción de Costa Rica, 1997). Actualmente se utiliza un preparado de la harina del plátano precocida como complemento de otros alimentos procesados, donde la cantidad de humedad contenida en dichos productos representa un parámetro determinativo para efectos de conservación, transporte, almacenamiento, etc.

En este sentido, en la producción de harinas precocidas la actividad de agua (a_w) se convierte en un parámetro que indica la disponibilidad del líquido en el alimento para que existan reacciones químicas, bioquímicas y

desarrollo microbiano tal como lo describen Comaposada, Gou y Arnau (2000). Por esto la actividad de agua es usada como indicador para predecir la vida útil del producto o alimento.

La isoterma de un producto relaciona gráficamente, a una temperatura constante, el contenido en humedad de equilibrio con la actividad termodinámica del agua del mismo, ya que en el equilibrio, este último parámetro es igual a la humedad relativa del aire que rodea al producto. Las isotermas son importantes para el análisis y diseño de varios procesos de transformación de alimentos, tales como secado, mezcla y envasado de los mismos. Además son importantes para predecir los cambios en la estabilidad de los alimentos y en la elección del material de empaque adecuado (Zhang *et al.*, 1996).

Algunas ecuaciones empíricas y semiempíricas se han propuesto para correlacionar el contenido de humedad de equilibrio con la actividad de agua de un alimento, sin embargo, la ecuación de GAB (Guggenheim *et al.*, 1984), es de amplio uso en alimentos. Esta ecuación está basada en la teoría de adsorción de BET (Brunauer *et al.*, 1938), la cual da una explicación física a los parámetros involucrados en ella (Kiranoudis *et al.*, 1993). Otro factor importante, a la hora de elegir la ecuación a utilizar, es la simplicidad y el tiempo que pueda necesitar el cálculo de la humedad de equilibrio (McLaughlin y Magee, 1998).

El objetivo de este trabajo es determinar experimentalmente las isotermas de adsorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “pelipita” (*Musa acunimata* X *Musa balbisiana*) a cuatro

temperaturas diferentes, con la finalidad de determinar el contenido de humedad de equilibrio y contenido de agua experimentales en la harina con base en las distintas ecuaciones propuestas en la literatura, utilizando análisis de regresión no lineal y el coeficiente de determinación (R^2) para determinar el mejor ajuste de las curvas.

Capítulo I: El problema

1. Planteamiento del problema:

El agua es el principal componente de la mayoría de los alimentos donde los microorganismos necesitan de su presencia en una forma disponible, para crecer y llevar a cabo sus funciones metabólicas (Coultate, 1984). La mejor forma de medir la disponibilidad de agua en los alimentos es obteniendo la actividad de agua, la cual es un factor determinante en el estudio de la estabilidad de los alimentos secos, donde existe una amplia relación entre la presión de vapor de agua del alimento y la presión de vapor del agua líquida pura a la misma temperatura. (Singh y Heldman, 1998).

Así la actividad del agua se convierte en un parámetro ampliamente utilizado para indicar la relación entre la humedad relativa de equilibrio de la atmósfera que le rodea. Este término fue introducido durante los años 50 para describir el estado del agua en los productos alimenticios, ya que este es el factor principal para el desarrollo del crecimiento microbiano, la producción de toxinas, y reacciones enzimáticas (Leung, 1986). Esto se debe principalmente a que la mayoría de las bacterias no pueden crecer por debajo de una actividad de agua de 0,90 (Bone, 1987), factor utilizado como parámetro regulador por la Food and Drug Administration de Estados Unidos referente a los alimentos enlatados (Barbosa, Cánovas y Vega, 2000).

Tal lo expresa Comaposada *et al.*, (2000) y como se mencionó anteriormente, la actividad de agua (a_w) se convierte en un parámetro que

indica la disponibilidad de agua en un alimento para que existan reacciones químicas, bioquímicas y desarrollo microbiano. Entonces, el comportamiento de los alimentos durante el almacenamiento depende de la temperatura y del contenido de humedad que presenta el producto, y no se debe emprender ningún análisis en esta materia sin referirse a dichos parámetros.

Uno de los parámetros más importantes en alimentos deshidratados como son en este caso las harinas precocidas es la condición de equilibrio de humedad que determina el límite del proceso, siendo este una parte importante del gradiente que provoca el movimiento del agua. Por ello según Pacheco (2005), el conocimiento de las isothermas de adsorción en los alimentos es de gran importancia para el desarrollo en la industria alimenticia, ya que brindan información útil para la optimización del proceso de secado y el diseño de secaderos, la selección del material de empaquetamiento, la predicción de la vida útil del producto y de la evolución en el contenido de humedad durante el almacenamiento, traslado y comercialización.

En este sentido en esta investigación se desarrolló el estudio de las isothermas de adsorción de humedad de la harina precocida elaborada a partir de topocho verde “pelipita”, obteniendo un enfoque del comportamiento de la harina a diferentes temperaturas, para predecir su comportamiento contribuyendo así a estudios futuros para la comercialización más adecuada de este producto.

2. Justificación:

Cuanto menor sea la actividad de agua en una harina precocida mayor será su vida útil, ya que en general los alimentos con baja actividad acuosa se conservan en óptimas condiciones durante períodos más largos de tiempo. Por el contrario, aquéllos cuya actividad de agua es elevada están sometidos a contaminación microbiológica y su conservación es mucho más delicada. Esto se debe principalmente a que la mayoría de las bacterias, hongos, mohos y levaduras que son mortales para la salud, pueden crecer por encima de actividades de agua mayores a 0,7. Basándose en este hecho se emplea la deshidratación o desorción como alternativa para evitar el deterioro microbiológico de los alimentos, y prever riesgos virales en los consumidores, de allí una de las principales justificaciones para de la elaboración de alimentos deshidratados, Martínez *et. al* (1998).

Pacheco (2005), considera que la producción de harinas a base de plátano verde como un proceso sencillo y de bajo costo que permite obtener productos con mejores características de almacenamiento, ya que al eliminar la mayor parte del agua de la fruta, se disminuye también la actividad acuosa, lo que permite su conservación a temperatura ambiente en un empaque adecuado. Las características más importantes del proceso para la producción de harinas a partir de plátano y banano es que se requiere de un equipo sencillo, puede aplicarse con el excedente de producción, permite el aprovechamiento de la fruta de rechazo, puede apoyar al control de la oferta y precio de la materia prima.

Actualmente en Latinoamérica se están elaborando numerosos productos alimenticios deshidratados que involucran el uso de harinas

precocidas de cereales, leguminosas, verduras, etc.; empleados como base seca en un 50 – 65 %, debido a su alto contenido en fibra dietética y por los efectos fisiológicos que tienen sobre el organismo como disminución del tiempo de tránsito intestinal, reducción del nivel de colesterol y la reducción de determinadas enfermedades como cáncer de colon y diabetes (Pacheco 2005), dando mayor importancia en el mantenimiento del trastorno intestinal que es un factor clave en tratamientos de deshidratación severa, ya que al ser la especie “pelipita” rica en almidón, permite hidrolizar una parte del mismo durante la digestión, y el resto en el intestino garantizando la hidratación del mismo.

Según Torrealba (2006), el plátano verde está siendo utilizado en el estado Zulia por una procesadora de harina precocida exclusiva para este tipo de vegetal (PROINPLANT), sin embargo el topocho verde por pertenecer a la misma familia de musáceas y ser resistente a ciertas enfermedades que atacan estos cultivos como la Sigatoka Negra, representa ventajas de bajo costo de cultivo y alta productividad (Acevedo, 1986), pudiendo así utilizarse en combinación con la harina precocida de plátano verde para las mezclas de base seca de alimentos deshidratados.

En tal sentido la presente investigación pretende aportar conocimientos al estudio de las condiciones de almacenamiento y conservación de la harina del topocho verde ABB “pelipita” (*Musa acuminata* x *Musa balbisiana*), por predicción de la actividad de agua, que sirvan como referencia a estudios subsiguientes.

3. Alcances y limitaciones de la investigación:

El alcance de esta investigación es caracterizar las isothermas de sorción de humedad experimentales de la harina precocida de topocho verde (ABB) “pelipita” (*Musa acunimata* x *Musa balbisiana*) a diferentes temperaturas (25, 30, 35 y 40 °C), en un rango de actividad de agua de 0,202 – 0,835.

Para lograr una descripción matemática del proceso de sorción de humedad se han propuesto diversas ecuaciones, entre las que encontramos el modelo de Brunauer, Emmett y Teller (BET), (Ferro-Fontán, Iglesias y Chirife, 1982), que presenta un rango limitado de aplicabilidad, hasta un a_w de 0.05 a 0.4, el modelo de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB), con un rango de aplicabilidad de 0.1 a 0.9 de a_w , entre otros. En los últimos años el modelo de GAB ha sido ampliamente utilizado para la descripción de isothermas de sorción de diversos alimentos, trabajaron con alimentos de origen vegetal y animal. La utilidad de los modelos de BET y GAB, dependerá en mayor grado del comportamiento sorcional de la harina en estudio, de la cual se realizó el modelado de las isothermas empleando un modelo matemático – estadístico de regresión no lineal y el coeficiente de determinación (R^2), con ayuda de los programas computacionales Stata versión 10.0 y PASW Statistics PLUS versión 18, para obtener el mejor ajuste; de lo contrario se pretende desarrollar un modelo que proponga una mejor definición y ajuste de las isothermas de sorción de la harina precocida de topocho verde (ABB) “pelipita” (*musa acunimata* x *musa balbisiana*) ya que si se quiere determinar el tiempo de vida útil del producto se deberá considerar aquel modelo que mejor ajuste a los datos experimentales de aquel que posea un mayor fundamento teórico y es de considerar que otro factor importante es la simplicidad del mismo, ya que el que posea un menor

número de parámetros requerirá menor tiempo para ser procesado (McLaughlin *et al*, 1998).

No existen limitaciones que afecten marcadamente la presente investigación. Sin embargo, se carece de una muestra comercial de harina precocida de topocho verde que sirva de punto de comparación para el estudio del comportamiento sorcional de la harina que se pretende estudiar, a esto se le suma la inexistencia de datos tabulados que puedan servir como parámetros para establecer un mejor ajuste de los datos que se obtengan en esta investigación.

4. Objetivos:

4.1 Objetivo general:

Determinar las isotermas de sorción de humedad en harina precocida de topocho verde (ABB) “pelipita” (*Musa acuminata* x *Musa balbisiana*) a cuatro temperaturas diferentes.

4.2 Objetivos específicos:

4.2.1. Predecir la actividad del agua a_w en la harina precocida de topocho verde (ABB) “pelipita” (*Musa acuminata* x *Musa balbisiana*) ajustando los datos de sorción de humedad a un modelo matemático cuadrático de regresión no lineal en contraposición con los modelos de BET (Brunauer *et al.*, 1938), Chang y Pfof (1967), GAB (Guggenheim *et al.*, 1984) y Ratti (1989).

4.2.2. Determinar el valor de la monocapa para estimar la humedad crítica de almacenamiento de la harina precocida en estudio.

4.2.3. Desarrollar un modelo matemático para predecir la actividad del agua en la harina precocida de topocho verde (ABB) “pelipita” (*Musa acuminata* x *Musa balbisiana*) en caso de que no se ajusten los datos de sorción de humedad con las ecuaciones de BET (Brunauer *et al.*, 1938), Chung y Pfof (1967), GAB (Guggenheim *et al.*, 1984) y Ratti (1989).

Capítulo II: Marco teórico

Antecedentes de la investigación:

Entre los trabajos más recientes y de carácter relevante que preceden a esta investigación se encuentran algunos investigadores que determinaron características sorcionales de vegetales comestibles, con base en las teorías, ecuaciones y modelos que permiten obtener los parámetros fundamentales para tales fines.

Sandoval, Barreiro, Tovar y Angueira (2002), estudiaron las características de sorción del cacao fermentado en polvo (*Theobroma cacao*), en la Universidad del Zulia, donde determinaron la actividad del agua a tres temperaturas diferentes (5, 15 y 30)°C observando que no existían diferencias significativas entre las isothermas lo que les permitió ajustar sus datos a una isoterma única. Estos investigadores utilizaron la ecuación de Halsey ($R^2=0,969$) ya que esta se adapta al rango del estudio de actividad del cacao fermentado en polvo, y empleando la ecuación de BET (Brunauer *et al.*, 1938), obtuvieron el valor promedio de la humedad asociado a la monocapa (3,56 g H₂O/100 g sólido), para el producto. A su vez observaron incremento en el calor isostérico de sorción a medida que se aumentaba la temperatura. Su investigación sirve como predicción para estimar la estabilidad del cacao de grado fino durante su almacenamiento.

Posteriormente en el 2003, Sandoval trabaja nuevamente con isothermas esta vez junto a Barreiro y Fernández, realizando un estudio de las características de sorción de seis líneas de malta de cebada, de origen belga (Plaisant), las cuales se trabajaron a un rango de temperaturas entre

15°C y 35°C. Entre los resultados obtuvieron que el efecto de la temperatura no tuvo significancia a una actividad de agua de 0.5; que por encima de este valor de a_w se observan resultados esperados en base a lo reportado por otros autores para productos ricos en azúcar, tal como ocurre con la malta de cebada. Así mismo los investigadores obtuvieron una mejor adaptación de los datos experimentales a los modelos de BET, y Harkins-Jura, Smiht – Henderson para a_w mayor a 0.50. Finalmente el valor de la monocapa se obtuvo en base a las ecuaciones de BET y GAB para a_w de 0.16 a 0.19 y 0.19 a 0.21 respectivamente.

Años más tarde Chaves, Sgruppo y Avanza (2004), realizan una investigación referente al estudio de las isothermas de adsorción de berenjenas deshidratadas, donde sometieron a rodajas de berenjenas a un proceso de deshidratación (a temperaturas de 50, 70 y 90)°C, para luego determinar la actividad del agua a cuatro temperaturas diferentes (5, 10, 20, 30)°C, determinando que la temperatura de secado no influye de forma significativa sobre las isothermas de adsorción dentro del rango de temperaturas estudiado. Para modelar las isothermas utilizaron las ecuaciones de BET (Brunauer *et al.*, 1938), BET modificada (Wiswanathan, 2003), GAB (Guggenheim *et al.*, 1984) y la ecuación de Ferro – Fontán (1982); donde esta última fue el modelo que mejor se adaptó en el rango de temperaturas estudiado, ya que este proporcionó un mejor grado de ajuste a los datos experimentales basándose en la determinación del error relativo promedio balance porcentual (%P = 6,8%), mientras que para los otros modelos arrojó grados de ajuste significativamente superiores (%P > 10%).

Vega, Andrés y Fito (2005), desarrollaron una investigación referente al modelado de la cinética de secado del pimentón rojo (*Capsicum annuum* L. cv Lamuyo), donde se secaron las muestras de pimentón con corrientes de aire caliente en un rango de temperaturas establecido (50 - 80)°C, para posteriormente obtener la isothermas de sorción de humedad a tres temperaturas diferentes (10, 20 y 30)°C, las cuales se ajustaron en base a los modelos de GAB (Guggenheim *et al.*, 1984), BET (Brunauer *et al.*, 1938), Henderson (1987), Caurie (1981), Oswin (1946), Halsey (1948) y Smith (1947); evaluando estos con análisis estadísticos de porcentaje de error relativo medio y coeficiente de regresión lineal R^2 . Se consideró que la ecuación de GAB fue la que mejor se ajustó a los datos de humedad de equilibrio del pimentón en función de su actividad de agua para las tres temperaturas de trabajo ($R^2 = 0,95$), el cual afirman que es el modelo que sirve como herramienta indispensable para el estudio de isothermas y procesos de secado en diferentes condiciones ambientales.

Luego Landaeta (2005), estudió las características de sorción de humedad de la harina precocida de batata (*Impomea batata spp*), trabando en un rango de actividad de agua entre 0,2 y 0,835 a cuatro temperaturas diferentes, los datos los analizó utilizando la ecuación lineal cúbica de estructura de la actividad acuosa ($a_w = \beta_0 + \beta_1X + \beta_2X^2 + \beta_3X^3 + \beta_4X^4$), y con el coeficiente de determinación ($R^2 = 0,9968$ a $0,9984$). La investigadora determinó que el valor de la monocapa no varía proporcionalmente con la temperatura en base a los resultados que obtuvo al someter los datos experimentales a las ecuaciones de Henderson (1952), Iglesias y Chirife (1978), Ratti *et al.* (1989) y la ecuación de GAB (Guggenheim *et al.*, 1984).

Peláez y Ferrer (2006), evaluaron los modelos de BET (Brunauer *et al.*, 1938) y GAB (Guggenheim *et al.*, 1984) de isothermas de sorción en harinas de plátano y yuca, donde la ecuación de GAB presentó un mejor ajuste para la predicción de las humedades de equilibrio, experimentalmente se comprobó que ofrece un rango más amplio de aplicabilidad para la actividad del agua ($a_w = 0,0 - 1,1$). Asimismo concluyeron que los calores de sorción (Q_s), obtenidos con la ecuación de BET responden a una variación entre 6.81 y 11.91 kJ/mol, correspondiendo a una adsorción física o de Van Der Waals (Fisiosorción), caracterizada por tener calores de adsorción menores a 41.67 KJ/Mol.

Posteriormente Torrealba (2006), determinó las isothermas de sorción de humedad en harina precocida de plátano verde (*Musa paradisíaca L.*), donde trabajó a cuatro temperaturas diferentes (20, 25, 30 y 35 °C), en un rango de actividad de agua de 0,202 a 0,835; arrojando el mejor ajuste de los datos experimentales con los modelos de Ratti *et al.* (1989) y Chung y Pfof (1967). Así mismo la ecuación de BET (Brunauer *et al.*, 1938) dio los mejores resultados para determinar el valor de la monocapa (0,0243 y 0,0033 g de H₂O/g de sólido), en comparación con la ecuación de GAB (Guggenheim *et al.*, 1984). A su vez, el investigador concluye que el calor isostérico de sorción de la harina varía con la temperatura y el contenido de humedad al evaluar el calor isostérico requerido para alcanzar el equilibrio sorcional con base en la ecuación de Clausius-Clapeyron en su forma integrada (Soekarto y Steinberg, 1981). Este sin duda representa el antecedente más relevante a la presente investigación, ya que se estudió un producto proveniente de las musáceas, familia a cual pertenece el topocho (ABB) “pelipita” (*Musa acuminata x Musa balbisiana*) y además se buscan alcanzar objetivos similares.

Más tarde Vega, Lara y Lemus (2006), Estudiaron las isothermas de adsorción en harina de maíz (*Zea mays L.*), trabajando a tres temperaturas diversas (7, 22 y 45 °C), ajustando los datos con el coeficiente de regresión (R^2) y el porcentaje de error medio relativo (%E), en función de los cuales se observó que los modelos propuestos por GAB (Guggenheim *et al.*, 1984), Oswin (1946) y Halsey (1948) ajustaron mejor los datos experimentales. Además, se determinó que la humedad de la monocapa (X_m) y la humedad de seguridad (X_s), presentaron dependencia con la temperatura en función de la energía de activación ($E_a = 13,6$ y $3,3$ kJ/mol). Finalmente en base a la ecuación de Clausius-Clapeyron (Soekarto *et al.*, 1981) se obtuvo el calor isostérico de sorción de la harina con un máximo de 21 kJ/mol, para una humedad de 0,075 g agua/g, donde este parámetro se modeló utilizando la ecuación propuesta por Tsami (1990).

García, Schmalko y Tanzanello (2007), determinaron las isothermas de adsorción y cinética de secado de ciertas hortalizas y aromáticas cultivadas en misiones cuyo propósito fue desarrollar un sistema de secado para la obtención de hortalizas: cebollita de verdeo (*Allium cepa L.*), puerro (*Allium porrum L.*) y pimiento verde (*Capsicum annuum L.*), y las plantas aromáticas: orégano (*Origanum mejorana L.*) y perejil (*Petroselinum sativus Hoffm.*). Donde para determinar la cinética de secado, se utilizó una capa delgada de material en un secadero de flujo transversal a 60°C. Los valores experimentales de las isothermas de adsorción se ajustaron al modelo de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB) y los errores promedios porcentuales variaron entre el 5,05 y 11,17%. Finalmente los tiempos de secado para los materiales estudiados variaron entre 82 y 250 minutos.

En ese mismo año Arana e Iturbe (2007), realizaron una investigación en la que determinaron las isothermas 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, en la primera parte se aplicaron los modelos matemáticos de BET (Brunauer *et al.*, 1938), GAB (Guggenheim *et al.*, 1984), Caurie (1981), Oswin (1946), Henderson (1952) y Bradley (1981); para el ajuste de las isothermas experimentales obtenidas. De los cuales mejor se adaptaron los modelos de GAB, Caurie y Oswin, donde los valores de la monocapa obtenidos experimentalmente aumentan o disminuyen en razón inversa con la temperatura.

Montes, Torres, Andrade, Pérez, Marimon y Meza (2008), realizaron el modelado de las isothermas de desorción del ñame (*Dioscorea rotundata*), donde se determinaron experimentalmente los valores de contenido de humedad de equilibrio para ñame a cuatro temperaturas diferentes (45, 55 y 70 °C) y un rango de humedades relativas (10 a 67%). Los investigadores emplearon la técnica experimental del método dinámico para determinar las isothermas de desorción, donde las isothermas de desorción fueron ajustadas a los modelos matemáticos de GAB (Guggenheim *et al.*, 1984), BET (Brunauer *et al.*, 1938), Smith (1947), Oswin (1946), Henderson (1952) y el modelo de Peleg; determinando que dicho modelo es el más adecuado para correlacionar los datos obtenidos.

Revisión Bibliográfica:

Generalidades sobre las musáceas y el topocho (ABB) “pelipita” (*Musa acuminata* X *Musa balbisiana*):

Las musáceas tienen su origen en Asia Sudoriental. La *Musa acuminata* tuvo su origen en la península de Malasia o islas cercanas, de donde fue llevada a otros lugares como Filipinas e India, donde se mezcló con ejemplares de *Musa balbisiana* dando origen a grupos híbridos de los cuales se derivan los plátanos y guineos. Prácticamente desconocidas en América aún a finales del siglo pasado (Simmonds, 1973), cuya clasificación es la siguiente:

Familia: Musáceas

Género: *Musa*

Serie: Emusa

Hibridación: *Musa acuminata* x *Musa balbisiana*

Las musáceas en términos generales han originado el fenómeno de la partenocarpia y desaparición de la semilla de la *Musa acuminata*. Los cambios posteriores se basaron en la hibridación de *M. acuminata* con *M. balbisiana* y la aparición de caracteres triploides y tetraploides entre los productos. En términos generales parece ser que los grupos híbridos se originaron alrededor del área principal de evolución. Así, los plátanos AB, AAB, y ABB son característicos de la India y parece existir un segundo

centro de diversificación de los tipos AAB y ABB en las Filipinas. Esto pareciera indicar que en estos países los grupos híbridos se originaron mediante cruzamientos de la *Musa balbisiana* local con linajes comestibles de *Musa acuminata* traídos de fuera (Simmonds, 1973).

Los clones triploides son mucho más numerosos que los diploides y los tetraploides, y los códigos asignados AAA son característicos de bananos con bajo contenido de almidón y alto contenido de azúcares. Así, los AAB con predominancia acuminata se consideran plátanos de tipo cocción para efectos de consumo; y los triploides de tipo ABB con predominancia balbisiana poseen bajo contenido de azúcares y alto consumo en almidón (Cheesman, 1948).

Subespecies de las Musas:

En la serie Emusa se distinguen los cultivares triploides derivados del cruce entre *Musa acuminata* (AA) y *Musa balbisiana* (BB) que dan origen a las musáceas comestibles más importantes (Simmonds, 1973):

AAA: Bananos como Cavendish y Gros Michel

AAB: Plátanos como Curraré, Dominico y Hartón

ABB: Guineos como Cuatrófilo, Topocho y Pelipita

El subgrupo ***Musa AAB*** cuyo nombre más común es el de "Dominico" o "French Plantain" o "Curraré", está formado por un conjunto de frutos medianamente apretados que, en relación con el eje floral, forma un ángulo agudo. Las dos filas de frutos de cada mano están casi paralelas entre sí. Sus frutos se curvan casi 90° en su parte basal; la forma general del fruto es curvada y alcanza una longitud promedia de 26.1cm, un diámetro mayor de 4.39 cm y un peso de 270 g. Un racimo estándar está formado por 80-90 frutos aproximadamente, (Cheesman, 1948). Esta variedad se utiliza ampliamente en la alimentación humana como ingrediente para la preparación de sopa, y preparaciones del fruto cortado en secciones oblicuas fritas en maduración verde como "troncos", "patacones" o "tostones" y completamente maduro como "tajadas" o "maduro" (Aranzazu *et al*, 2002).

Dentro de este mismo subgrupo de Musas AAB, se encuentra el "Hartón", que es genéticamente más estable que el "Dominico". Su racimo es coniforme, con frutos muy grandes y distanciados entre sí; los dedos son largos y delgados con aristas pronunciadas que engruesan suavemente y terminan en un pico largo, grueso coniforme; la sección transversal es pentagonal pero el endocarpio es en forma de cilindro; su longitud promedio es de 33.5 cm y el diámetro mayor de 4.77cm para un peso promedio de 335 g. Un racimo estándar está formado de 35 a 40 frutos aproximadamente, (Cheesman, 1948). Esta variedad al igual que el "Dominico" es ampliamente utilizada para elaborar sopas, tostones y tajadas fritas. Se considera el más apropiado para la elaboración de harinas precocidas destinadas a la alimentación de niños, debido a su propiedad de restaurar la flora intestinal, entre otras (Aranzazu *et al*, 2002).

El clon del grupo ***Musa ABB***, Posee un gran número de nombres comunes como. "Pelipita", " Topocho ", " Cuatrofilos ", "Pacífico", entre otros. El cuerpo del fruto, de mediano a grueso, es casi recto por su lado ventral y exteriormente curvado. Cuando madura el pericarpio es amarillo sin cera y el endocarpio crema-rosado pálido. Sus dimensiones promedio son de 24.1cm de longitud, 5.6 cm de diámetro mayor y 300g de peso (Cheesman, 1948). Se utiliza en la alimentación popular, bien sea como fruta verde o madura, asada o fruta en forma de " tajadas" (Aranzazu *et al*, 2002).

El clon "Pelipita" ABB (*Musa acuminata* x *Musa balbisiana*): pertenece al grupo Musa ABB, y es conocido comúnmente como " Pelipita ", " Filipita " y " Filipina". El cuerpo del fruto es de mediano a grueso ligeramente curvo. Su sección transversal es pentagonal, más o menos redondeada y de aristas prominentes cuando está verde, las cuales se suavizan al madurar. En este estado el pericarpio es amarillo sin cera, con manchas rojizas, el endocarpio es rosado pálido. Sus dimensiones son 22.8 cm de longitud y 5.31cm de diámetro mayor, con un peso de 260 g. Las formas de consumo son idénticas a la de los demás plátanos (Cheesman, 1948). Es excelente para la preparación de " tostones" y para la elaboración de harinas precocidas que al igual que el clon Hartón tiene propiedades para restaurar la flora intestinal en personas que han sufrido deshidrataciones pasivas y severas (Aranzazu *et al*, 2002).



Fuente: Consomer, 2006.

Figura 1. Topocho (ABB) verde “Pelipita” (*Musa acuminata* x *Musa balbisiana*)

El porte de la planta del topocho “Pelipita” es mayor que el observado en otros clones de topocho que se cultivan en los llanos occidentales de Venezuela (Acevedo, 1986), así como también la robustez del seudotallo. El tiempo a la cosecha del “Pelipita” puede prolongarse hasta 160 días, durante el verano presenta mayor productividad demostrando mejor capacidad para soportar las altas tensiones hídricas propias de la época. La especie “Pelipita” tiene menor capacidad de producir hijos con respecto al topocho común.

En cuanto a las plagas y enfermedades que suelen padecer estas plantas, Sánchez (2003) explica que las más comunes son los Thrips, algunos "taladros", los Nemátodos y algunos hongos bastante temibles por los nefastos resultados de sus ataques como la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* var. *difformis*). Esta se cataloga como una de las enfermedades más serias que ataca al cultivo del plátano donde la característica de mayor virulencia de la enfermedad, se manifiesta por una

alta capacidad esporulativa, con ciclos reproductivos más cortos y elevada severidad sobre el tejido afectado (hojas). Sin embargo el topocho “pelipita” por ser un triploide del tipo ABB se caracteriza como resistente a la Sigatoka negra tal como lo expresan Hernández *et al.*, (2006), al ser esta especie ABB introducida en programas clásicos de mejoramiento, que se basan en la utilización de la resistencia encontrada en especies silvestres de musa e híbridos obtenidos.



Fuente: Consomer, 2006.

Figura 2. Hoja de banano afectada con la Sigatoka Negra.

Composición química general de las musáceas:

La pulpa del plátano maduro está constituida por agua aproximadamente en un 70 %, el material sólido es en su mayor parte carbohidratos donde el contenido de grasa y proteínas es muy bajo. Se han registrado 11 vitaminas siendo las más abundantes en la fruta: A, A₁, B₂, y C. Los carbohidratos de los plátanos dulces o fruta se presentan principalmente en forma de azúcares en los clones feculentos, donde la

hidrólisis del almidón ocurre con relativa lentitud y cuando el plátano alcanza la madurez casi la tercera parte permanece sin hidrólisis.

Cuadro 1. Material digerible del banano.

Material Digerible	Porcentaje (%)
Proteína cruda	3,50
Extracto de éter	0,50
Extractos libres de N	47,60
Fibra cruda	12,70
Materia orgánica	64,20
Almidón	57,20
Relación nutritiva	1:18

Fuente: Simmonds, 1973.

El valor nutricional de las musáceas en general es alto en vitaminas A y C, fósforo y potasio, aunque contiene en pequeñas cantidades otros minerales y vitaminas. Su valor calórico es alto aproximadamente 104 cal/100 g. En la siguiente tabla se muestra la composición nutricional de la pulpa de las especies musa:

Cuadro 2. Composición de la pulpa del banano.

COMPONENTES	UNIDADES	VALORES
Agua	%	70,000
Carbohidratos	%	27,000
Proteínas	%	1,200
Fibra	%	0,500
Grasa	%	0,300
Cenizas	%	0,900
Calcio	%	0,080
Fósforo	%	0,292
Hierro	%	0,006
Potasio	%	1,920
B-caroteno (vitamina A)	p.p.m.	2,400
Tiamina (vitamina B1)	p.p.m.	0,500
Riboflavina (vitamina B2)	p.p.m.	0,500
Niacina	p.p.m.	7,000
Piridoxina (vitamina B6)	p.p.m.	3,200
Ácido ascórbico (vitamina C)	p.p.m.	120,000

Fuente: Simmonds, 1973.

Comercialización de los cultivos de bananos en general:

Entre los usos comerciales existentes de la gran variedad de formas hacen de la banana y el plátano un alimento extremadamente versátil ya que la banana se conserva en estado comestible poco tiempo, pero se han desarrollado numerosos medios de conservación. (Fernandez, 1980). La harina tostada de plátanos verdes se ha utilizado como complemento en la preparación de alimentos deshidratados.

La harina de las musáceas en general representa un producto importante para ser industrializado, con el fin de utilizarse en la producción de concentrado animal y otros productos que se podrían desarrollar para consumo humano. La harina que se obtiene, tiene diferentes tamaños de partículas, por lo que la totalidad del producto se debe hacer pasar por unos tamices para obtener las diferentes fracciones por separado. De esta forma se llega a obtener un producto más fino. Una vez lista la harina se puede empacar en bolsas, preferiblemente de polipropileno. Es necesario determinar las condiciones apropiadas para el almacenamiento de este producto ya que esto determina en la mayoría de las veces su tiempo de vida útil, así una vez listas las bolsas, se sellan debidamente para evitar que entre humedad del medio y a su vez que se vaya a contaminar con insectos o materias extrañas (Estudio de mercado del plátano, 2005).

En los últimos años se han realizado experimentos para envasar las bananas aún verdes, pero el látex que los frutos exudan resulta problemático, así como el oscurecimiento de la pulpa una vez descongeladas o desenlatadas. Para desactivar las [enzimas](#) de la pulpa responsables de la decoloración las bananas se sumergen antes de pelarlas en agua al borde del [punto de ebullición](#), y se añade [ácido cítrico](#) al 2% a la solución de salmuera en la que se envasan. La fruta usada de este modo debe recolectarse cuando la tasa de pulpa no supera 1/6 del peso de la fruta, o el producto resultante se decolora con facilidad al reaccionar el [tanino](#) de la pulpa verde con el hierro presente en su capa exterior (Aranzazu, 2002).

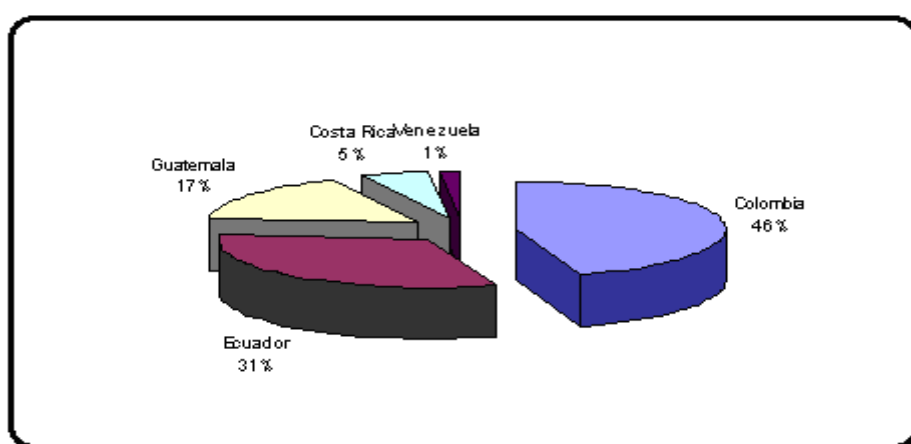
En forma de puré son un alimento frecuente para niños; con el único añadido de [ácido ascórbico](#), usado para prevenir la decoloración por

oxidación de la pulpa, el puré se produce industrialmente con los ejemplares descartados del embalaje en los países de origen. Se lo homogeneiza, pasteuriza y envasa, sea solo, combinado con un estabilizante celulósico como base para zumos, o combinado con puré de manzanas. Se lo incorpora también a preparados para helado, tortas y otros postres (Aranzazu, 2002). Los residuos, o los rechazos, de la cosecha de plátano son utilizados para alimentación de ganado, en particular de ganado vacuno y ganado porcino.

En Venezuela sólo una pequeña fracción de la producción mundial de plátanos es comercializada (0.6%) FAO/OMS (2002). Con unos 22 kg/persona/año, Venezuela se encuentra entre los países de consumo per cápita de plátanos bastante alto. Las plantaciones de plátano de exportación se encuentran en la región de Maracaibo, que cuenta con una excelente infraestructura portuaria y de transporte. El plátano venezolano es reconocido por su alta calidad, por lo cual reporta mayores precios en los mercados internacionales.

Los principales mercados del plátano venezolano son Estados Unidos, las islas de Aruba, Bonaire y Curazao y Puerto Rico. Según datos de FAO/OMS (2002), las exportaciones de Venezuela en los últimos nueve años se han mantenido estables; en el año 2003 exportó 4,060 ton que equivale a US\$ 1, 463,000 pese a que en el año 2002 y 2001 las exportaciones disminuyeron drásticamente.

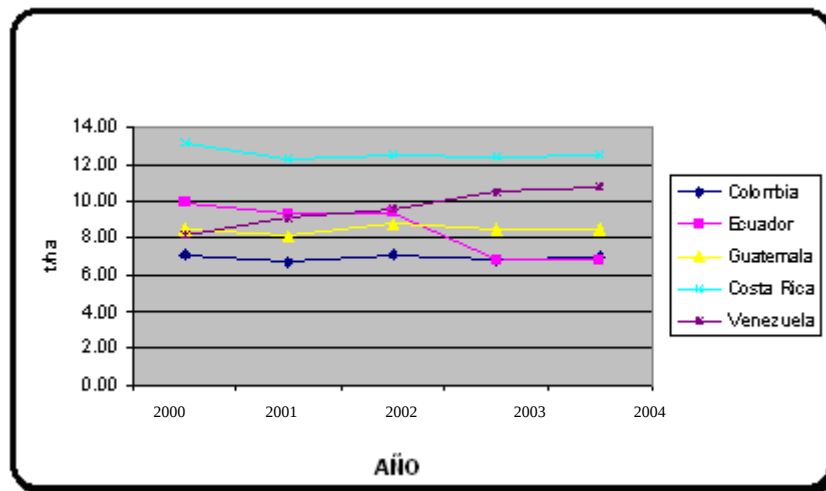
Las exportaciones a los países del área del Caribe tienen una mayor dinámica. Es de destacar que la cercanía con las Antillas Holandesas, convierten a Venezuela en su principal proveedor de alimentos. Por otra parte, en los últimos dos años, Puerto Rico se ha convertido en un importante comprador de plátano venezolano, representando en los últimos años alrededor de 13% del total de sus exportaciones (Estudio de mercado del plátano, 2005), tal como se refleja a continuación:



Fuente: FAO/OMS, 2002.

Figura 3. Principales países exportadores de plátanos en América Latina.

Venezuela, es uno de los principales países latinoamericanos productores de plátano, y un potencial competidor directo de Ecuador; presenta un comportamiento ascendente en sus niveles de productividad, a través del tiempo. En el último año, el rendimiento del cultivo de plátano fue de 10.8 t/ha, mientras que el promedio fue de 9.7 t/ha. Tal como se muestra a continuación en la siguiente figura:

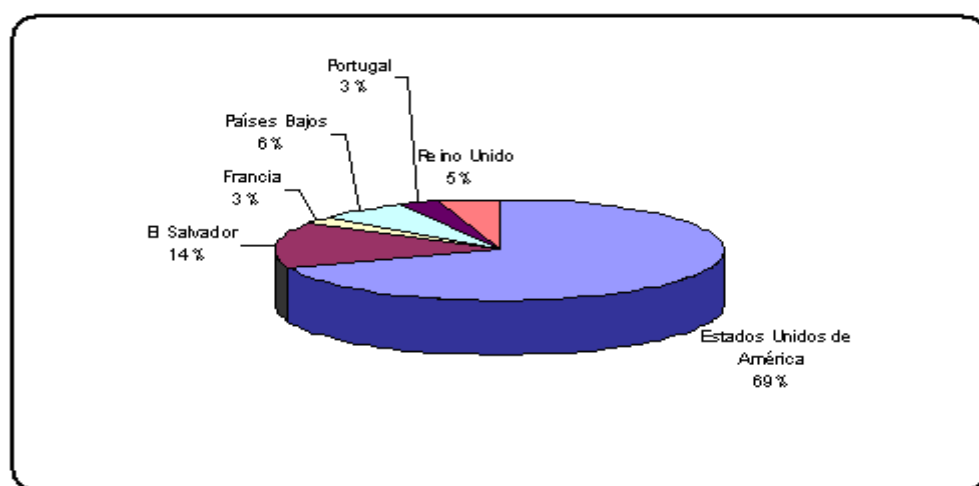


Fuente: FAO/OMS, 2002.

Figura 4. Rendimiento de los principales países exportadores de plátanos en América Latina.

El mercado del plátano en los últimos cinco años ha sido dinámico, debido a los cambios que se dan rápidamente en los países productores y exportadores. La participación de estos países en el mercado internacional está sujeta a la demanda por parte de los grupos étnicos, existiendo la posibilidad de ampliar la oferta en la medida en que se promueva el consumo de plátano fresco y procesado dentro de los segmentos de consumidores anglosajones y europeos, (Estudio de mercado del plátano, 2005). Colombia, Venezuela y Ecuador principales países exportadores de América del sur tienen oportunidades en el mercado estadounidense debido a que este país en los actuales momentos es considerado un gran consumidor de la fruta.

Los principales países importadores de plátano a nivel mundial según datos de la FAO son: Estados Unidos con el 69% de las importaciones del mundo (214,092 ton valoradas en US\$ 91.6 millones), El Salvador con 14% (43,509 ton por un valor de US\$ 9.1 millones), Países Bajos con 6% (19,977 ton valoradas en US\$ 13.1 millones), Reino Unido con 5% (13,945 t por un valor de US\$ 9.7 millones), Francia y Portugal con el 3% (8,236 t y 8,314 t por un valor de US\$ 4.6 y US\$ 3.9 millones, respectivamente). Esto se observa en la siguiente figura:



Fuente: FAO/OMS, 2002.

Figura 5. Principales países importadores de plátanos a nivel mundial.

Actividad de agua en los alimentos:

En los alimentos cuanto mayor sea el porcentaje de agua más susceptibles son a alterarse. Sin embargo, alimentos con la misma cantidad de agua pueden presentar diferente susceptibilidad al deterioro por lo que entra en juego un factor muy importante que es “la actividad de agua”, la cual hace referencia a la disponibilidad de el agua en el alimento (Leung, 1986). La actividad de agua queda definida de la siguiente forma bajo el símbolo a_w .

$$a_w = P_w / P_{w0} ; \quad (2.1) \quad \text{donde} \quad \left\{ \begin{array}{l} a_w = \text{Actividad de agua} \\ P_w = \text{Presión de vapor del agua del alimento} \\ P_{w0} = \text{Presión de vapor del agua pura} \end{array} \right.$$

Para establecer la actividad de agua de un alimento, se puede encerrar este en atmósfera cerrada y esperar a que el aire presente en dicha atmósfera, se encuentre en equilibrio con el alimento y se puede determinar experimentalmente empleando un dispositivo como un higrómetro electrónico (Bone, 1987). Entonces se tiene que:

$$a_w = \text{Humedad relativa (\%)} / 100 \quad (2.2)$$

La actividad de agua tendrá un valor máximo de 1 y mínimo de 0. Cuanto menor es este valor, menor será la susceptibilidad del alimento a deteriorarse. Si el agua en un alimento interacciona fuertemente con otros compuesto del propio alimento como iones (por ejemplo, la sal), moléculas polares (por ejemplo la glucosa) o apolares (por ejemplo, los ácidos grasos) menor será la actividad de agua y menor por tanto el peligro que presente de deterioro (Bone, 1987). Experimentalmente si el alimento tiene agua la cual interacciona con otros compuestos, saldrá menos agua al aire de la atmósfera y por tanto la humedad relativa del aire sería menor con lo que la actividad de agua que obtendríamos sería menor (Ryall, 1982).

La actividad de agua en un alimento que está por encima de la temperatura de congelación estará en función de:

- Contenido de agua del alimento: A mayor contenido, mayor actividad de agua.
- Temperatura: A mayor temperatura, mayor actividad de agua.

Por el contrario (Kiranoudis *et al.*, 1993), en los alimentos congelados la actividad de agua está en función de la temperatura por lo que no será un valor importante en este caso (por ejemplo, todos los alimentos congelados a -25° , $a_w = 0,79$). En estos casos se suelen construir isotermas de sorción de alimentos para conocer la actividad de agua de cada alimento a una determinada temperatura según su contenido en humedad. En dichas isotermas se representa la actividad de agua de un alimento frente a su contenido acuoso. Para ello, o bien se va deshidratando el alimento y se va midiendo su actividad de agua (isoterma de desorción), o bien se deshidrata el alimento y luego se va rehidratando y se mide su actividad de agua en los diferentes contenidos de humedad (isoterma de resorción o adsorción).

Al realizarse estas mediciones se debe tener en cuenta el fenómeno denominado **histéresis** que es la diferencia en el valor de actividad de agua que se obtiene para un mismo alimento según su contenido de humedad en función de si se está rehidratando o deshidratando un alimento. Si el alimento se rehidrata tendrá un valor de actividad de agua mayor para un mismo contenido de humedad que si se está deshidratando (Kiranoudis *et al.*, 1993). Ello es debido a que los alimentos tienen capilares en su estructura y al extraerse el agua, estos capilares se obturan, se cierran. Al rehidratar el alimento cuesta más que el agua vuelva a entrar en dichos capilares e incluso en muchas ocasiones no podrá entrar por lo que quedará mayor cantidad de agua disponible y será mayor la actividad de agua.

Una de las explicaciones referente al fenómeno de histéresis la plantean Chung y Pfoest, (1967) mediante el planteamiento de una teoría que denominaron “fenómeno de frasco y tinta” pretenden explicar el fenómeno sobre la base de la contracción del volumen que se produce durante la deserción de humedad en el proceso de secado. Es decir, la reducción de volumen del producto acarrea la disminución de los puntos de ligazón disponibles para ligar el agua con las moléculas de las sustancias, lo que conduce a la histéresis.

En las isotermas de sorción se pueden observar tres fases (Leung, 1986):

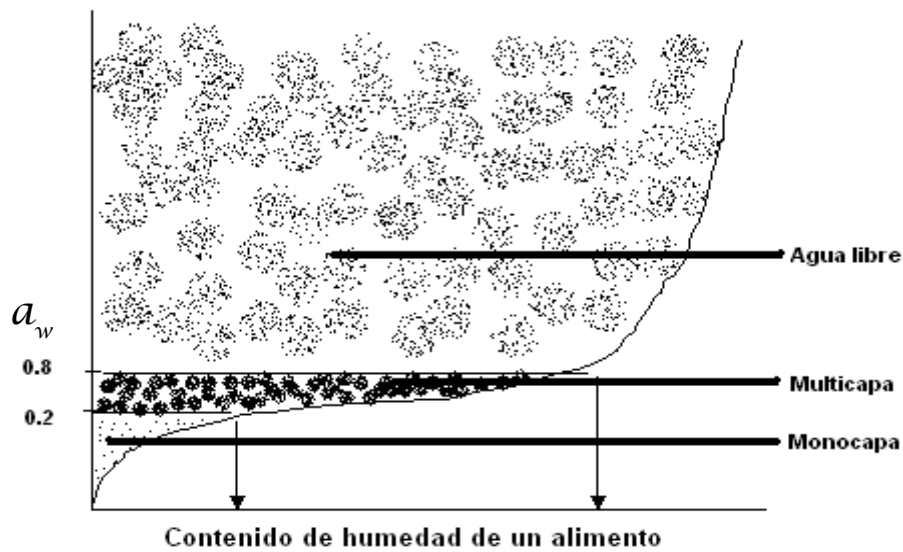
1.- Actividad de agua entre 0 y 0,2: Es agua que está fuertemente ligada en el alimento. Aquí el agua forma una capa monomolecular sobre solutos del alimento por lo que se le suele llamar agua monocapa. Es agua prácticamente imposible de extraer si no se destroza el alimento, no es congelable ni siquiera a temperaturas de -40°C y no está disponible para las reacciones químicas ni como reactivo, ni como disolvente. Representa en los alimentos en torno al 0,5 %. Suele ser, por ejemplo, el agua que forma puentes de hidrógeno con proteínas o con los grupos hidroxilo de los glúcidos.

2.- Actividad de agua entre 0,2 y 0,8: Es agua débilmente ligada. Esta agua está interaccionando con el agua de la monocapa, en lugar de con los solutos, por puentes de hidrógeno. Igualmente se considera agua

débilmente ligada a la que se encuentra condensada en los poros capilares de los alimentos. Esta agua es disponible para reacciones químicas pero no para los microorganismos. Representa al 5 % del agua presente en un alimento incluyendo el agua monocapa.

3.- Actividad de agua superior a 0,8: Es agua que no presenta ningún tipo de influencia por parte de los solutos. Es agua disponible y con gran movilidad. Esta agua se puede intercambiar con el agua multicapa. Se denomina también agua de la fase masiva y existen dos tipos:

- Agua libre: La que no está atrapada. Está en el espacio intercelular, por ejemplo entre las células de un vegetal.
- Agua atrapada: Esta atrapada en una estructura molecular.



Fuente: Leung, 1986.

Figura 6. Representación esquemática de la actividad del agua en un alimento en función del contenido de humedad.

En la figura anterior en el eje de las X se representa el contenido de humedad del alimento, en el eje Y la actividad de agua del alimento, desde la primera flecha hacia la izquierda: agua monocapa $a_w = 0-0,2$; entre las dos flechas: Agua multicapa. $a_w = 0,2-0,8$; y desde la segunda flecha hacia la derecha: Agua libre. $a_w = 0,8-1$.

El crecimiento microbiano se puede dar en actividades de agua a partir de 0,8 de forma general en el caso de las bacterias a partir de 0,91;

en el caso de levaduras 0,88 y en el de mohos 0,8 (Leung, 1986). Las bacterias halófilas, mohos xerófilos y levaduras osmófilas pueden crecer con actividades de agua inferiores a 0,8 pero nunca inferiores a 0,6. Así pues, si se reduce la actividad de agua de un alimento por debajo de valores de 0,8 será muy seguro microbiológicamente hablando.

La reacción de oxidación de lípidos se ve inhibida con actividades de agua entre 0,2 y 0,4. Con valores por debajo y por encima se ve favorecida siendo la única reacción de deterioro de un alimento que se puede producir con valores de actividad de agua por debajo de 0,2. Las reacciones enzimáticas se favorecen a partir de actividades de agua de 0,4 y a medida que aumenta esta cifra, se favorecen en mayor medida (Leung, 1986).

Las actividades de agua por debajo de 0,8 hacen al alimento muy seguro de un posible problema microbiológico pero no se inhiben las reacciones químicas y bioquímicas, en tanto que con actividades de agua por debajo de 0,3 los alimentos serán muy seguros en todos los aspectos, salvo con reacciones de oxidación.

En la congelación (Kiranoudis *et al.*, 1993) se da una disminución de la disponibilidad del agua ya que parte esta se encuentra en forma de hielo pero se altera la concentración de solutos en el agua que no está congelada y se pueden dar problemas dado que esta agua ha modificado su PH, potencial redox, etc. En cualquier caso, las bajas temperaturas reinantes son las que hacen los alimentos bastante seguros dado que no

pueden crecer microorganismos y se ven inhibidas las reacciones químicas y bioquímicas para las cuales, por otra parte, se pueden tomar otra serie de medidas para inhibirlas aún más.

Fenómeno de soción de humedad:

El agua contenida en los alimentos se presenta en distintas formas, en función de la naturaleza de los enlaces químicos que existen entre los componentes de la materia seca y las moléculas de agua, lo que determina los diferentes niveles de hidratación del producto (Rizvi, 1995).

Según Martínez, Navarrete y Chiralt (1996), parte del agua está estrechamente vinculada con la sustancia adsorbente y se compone de una capa monomolecular ligada a determinados agrupamientos moleculares fuertemente polarizados. Puede estar combinada con la sustancia por medio de enlaces químicos, o sea, es parte integrante de una sustancia dada, esta forma de agua se puede eliminar sólo bajo rigurosas condiciones de temperatura y tiempo. También se pueden encontrar en los alimentos una cantidad de agua contenida en una capa polimolecular que se fija sobre la capa monomolecular. Las distintas capas monomoleculares que componen la capa polimolecular están ligadas a la materia por medio de enlaces electromagnéticos conformando agua pseudoligada, no solvente, sin papel biológico y fuertemente adsorbida.

Cierta cantidad de agua se puede mantener libremente en los espacios correspondientes a los poros de los alimentos para Erba, Ertugay y Certel (2005), esta se mantiene débilmente en el sistema gracias a fuerzas capilares. Esta cantidad de agua se conoce como agua de impregnación estos investigadores la llaman agua libre o adsorbida, la cual tiene las mismas propiedades que el agua libre, este tipo de agua se evapora fácilmente en el secado.

Con base en los argumentos anteriores, el agua que está adsorbida se mantiene en los alimentos gracias a fuerzas de atracción molecular, o bien está firmemente ligada a la sustancia adsorbente, esta afirmación determina la definición de el término general "sorción" el cual se usa para denotar esta interacción agua-sustancia adsorbente, y los términos generales adsorción y desorción se usan especialmente para denotar el proceso de ganar o perder agua por medio de sorción (Primo, 1998).

Isotermas de sorción:

La humedad de equilibrio Martínez *et al.* (1998), la definen como el contenido de humedad de un material higroscópico después de estar expuesto a un ambiente en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa, durante un lapso prolongado. Se puede decir, además, que el material está en equilibrio higroscópico con el ambiente en que se encuentra cuando la presión de vapor de agua correspondiente a la humedad del material es igual a la presión de vapor de agua del aire

ambiente. Así para cada especie o variedad de material, la tensión de vapor tiene un valor característico acorde con la temperatura y el contenido de humedad del material.

La importancia que tiene la obtención de datos experimentales de equilibrio higroscópico de los productos agrícolas es bien conocida. Dada la importancia de este concepto, por sus innumerables aplicaciones en el secado, almacenamiento y manejo de los productos agrícolas, se han desplegado esfuerzos para obtener ecuaciones que expresen el contenido de humedad de equilibrio respecto de cada producto, en función de la humedad relativa y la temperatura del aire.

Según Erba *et al.* (2005), la utilidad de obtener esas ecuaciones es múltiple basándose en sus estudios realizados con sémolas y harinas, entre ellas se describen algunas razones:

a) Las variaciones continuas de temperatura y humedad del aire en contacto con los productos almacenados originan cambios en el contenido de humedad de equilibrio. En las investigaciones relativas al almacenamiento, frecuentemente es preciso calcular el valor de humedad por medio de dichas ecuaciones.

b) Los cálculos de secado, independientemente del sistema de secado que se ocupe y los valores de contenido de humedad de equilibrio se deben calcular incontables veces. Cabe destacar también la importancia de conocer esas ecuaciones de equilibrio higroscópico, para calcular la entalpía

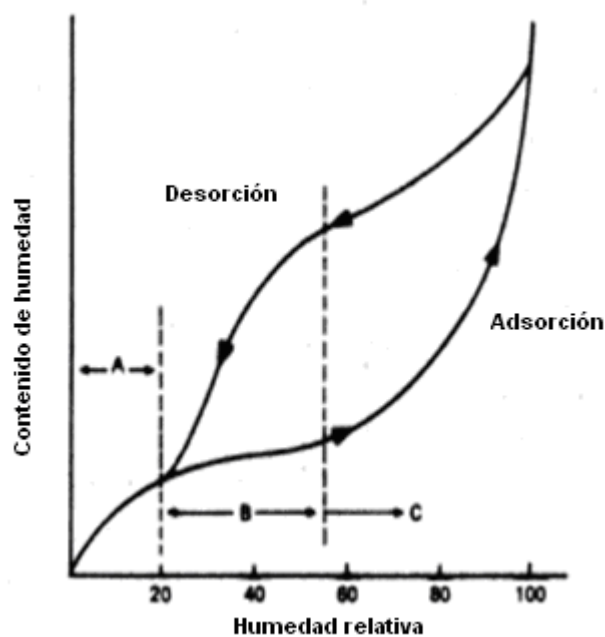
de la vaporización del agua de los productos biológicos en los procesos de secado.

Dado a los valores del contenido de humedad de equilibrio de los productos biológicos Erba *et al.* (2005), explican que estos dependen principalmente, de la temperatura y de la humedad relativa del aire, de la especie o variedad del producto, así la madurez fisiológica y la historia del producto, junto con la manera en que se obtuvo el equilibrio (adsorción o desorción), también influyen en la humedad de equilibrio.

Con base en los argumentos anteriores se tiene que una isoterma es simplemente una curva que relaciona el contenido de humedad de equilibrio de un producto, con la humedad relativa del aire o actividad de agua del producto (Erba *et al.*, 2005). El contenido de humedad de equilibrio de un material higroscópico, en determinadas condiciones de temperatura y humedad relativa de equilibrio, depende del camino que se siga para alcanzar el equilibrio. Así, para una misma humedad relativa, puede haber dos isotermas, denominadas isotermas de adsorción y de desorción, obtenidas en función de las condiciones experimentales iniciales. Esto, porque el material puede presentar un contenido de humedad menor o mayor que la humedad de equilibrio para las condiciones del ambiente, este fenómeno se llama histéresis (Leung, 1986). Las isotermas tienen forma sigmoideal, pues la isoterma de desorción presenta valores de humedad de equilibrio superiores al de la isoterma de adsorción.

Viades (2006), define a una isoterma de adsorción como una representación de la relación, en el equilibrio, entre la cantidad adsorbida y

la presión a una temperatura constante. Esto lo hace en referencia a los tipos de isothermas y sus estudios profundizados específicamente en la aplicabilidad de la isoterma de GAB a los alimentos. Así se presentan las isothermas de adsorción y desorción en función de la relación entre la actividad de agua y el contenido de agua., tal como se muestra en la siguiente figura:



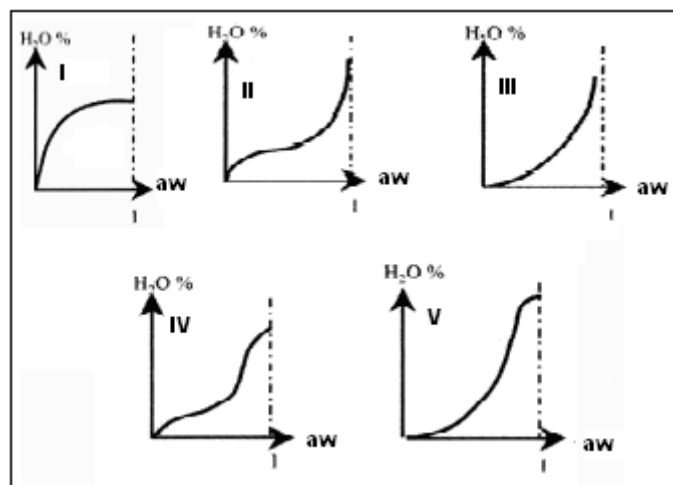
Fuente: Al-muhtaseb *et al.*, 2004.

Figura 7. Representación del contenido de humedad de un alimento en función de la humedad relativa.

En la figura anterior se observa que las curvas no coinciden, es decir, hay histéresis en el fenómeno de adsorción, donde a consecuencia para un valor dado de a_w , el contenido de humedad en la desorción es mayor que en

la adsorción, debido a que durante la primera suceden interacciones entre los componentes del alimento, de modo que los sitios físicos polares donde ocurre la adsorción se pierden, así, la actividad de agua para un valor dado de contenido de humedad es mayor en la adsorción que en la desorción. En la parte inferior de la curva de adsorción, están los alimentos deshidratados, al aumentar el contenido de humedad, se encuentran los alimentos de humedad intermedia y luego los de alto contenido de humedad.

Las isothermas presentan una la clasificación (Mathlouthi y Rogé, 2003), basado en el tipo de adsorción tal como se presenta a continuación:



Fuente: Arana e Iturbe, 2007.

Figura 8. Clasificación de las isothermas de adsorción.

Donde el tipo de isoterma I corresponde a la isoterma de Langmuir que describe la adsorción monomolecular de gas sobre un sólido poroso, el tipo II es la isoterma conocida como sigmoide característica de productos solubles, muestra una tendencia asintótica conforme la actividad de agua se acerca a la unidad. La isoterma tipo III o de Flory-Huggings se encuentra en la adsorción de un disolvente o plastificante como el glicerol. El tipo IV muestra la adsorción por un sólido hidrófilo “hinchable”, hasta que se alcanza el máximo de sitios de hidratación. Finalmente el tipo V llamado isoterma BET por Brunauer, Emmett y Teller (1938) que representa la adsorción multimolecular observada en la adsorción de vapor de agua sobre carbón. Los tipos de isothermas más frecuentes en los análisis de alimentos son los tipos II y IV.

Modelos de equilibrio higroscópico:

Se han propuesto diversos modelos teóricos, semiteóricos y empíricos para expresar el contenido de humedad de equilibrio de los alimentos. Pese a las investigaciones en este campo, ningún modelo teórico ha sido capaz hasta ahora de predecir exactamente el contenido de humedad de equilibrio de los alimentos en todas las gamas de temperatura y humedad relativa, además, sólo algunos modelos tienen en cuenta la temperatura como parámetro. Se han propuesto modificaciones a diversas ecuaciones y, en este caso, la gama de validez aumenta sustancialmente.

La dependencia con la temperatura de las constantes fisicoquímicas más importantes (X_m , C , k y X_s) se han evaluado inicialmente con la

ecuación de Arrhenius, obteniendo así la energía de activación (E_a), que representa la energía necesaria para unir o romper la primera monocapa de agua entre el sistema sólido-agua, donde la formación del enlace sólido-agua (adsorción) requiere de mayor energía que romper tal unión (desorción) definida por Soekarto *et al.*, (1981) como sigue:

$$\ln(D) = \ln(D_0) - E_a / RT \quad (2.3)$$

Donde: D es la constante en estudio; D_0 es el factor de Arrhenius; E_a es la energía de activación (kJ/mol); R es la constante universal de los gases y T es la temperatura absoluta (K).

Así mismo en base a los tipos de isothermas descritos anteriormente por Mathlouthi *et al.*, (2003) para ajustar las curvas isothermas experimentales, se han propuesto varios modelos matemáticos; donde hasta hace poco, el modelo con mayor aplicación en alimentos era la ecuación isoterma de Brunauer, Emmett y Teller (BET), la cual extiende el tratamiento de Langmuir, para explicar la adsorción multimolecular. Como consecuencia de la similitud entre las fuerzas responsables de la adsorción física y las fuerzas de licuefacción (fuerzas de Van Der Waals), la adsorción en las superficies tanto planas como convexas, no se limita a una monocapa sino que continua hasta que la superficie queda cubierta con una capa multimolecular de líquido. La isoterma BET se obtiene igualando las velocidades de condensación y evaporación en las diversas capas, supone que la energía

característica de adsorción del vapor corresponde a la primera capa, en tanto que la energía de licuefacción del vapor sirve para las capas siguientes, tal como sigue en la siguiente expresión matemática:

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m \cdot c} + \frac{(c - 1)}{V_m \cdot c} \cdot \frac{P}{P_0} \quad (2.4)$$

Donde V es el volumen adsorbido a la presión P , P_0 es la presión de vapor de saturación. La constante c contenida en la ecuación, representa la diferencia de energía entre las moléculas adsorbidas en la primera capa y la de las capas siguientes, la constante V_m representa la capacidad de adsorción en la primera capa. La constante c se expresa como:

$$c \approx - [(E_1 - E_L) / RT] \quad (2.5)$$

La ecuación BET es aplicable en el intervalo $0.05 < a_w < 0.35-0.4$, el intervalo de mayor interés en el área de los alimentos abarca desde a_w aproximadamente igual a 0.1 hasta 0.9, lo que representa una limitación importante en la aplicación de la isoterma BET. El valor de la cantidad adsorbida a presiones relativas mayores a 0.4, con frecuencia es menor que el predicho por la isoterma BET, y Mathlouthi *et al.*, (2003) ha propuesto tres razones para explicar este hecho: i) La energía de adsorción en la segunda capa es menor que la energía de licuefacción del adsorbato, ii) La estructura del adsorbente es tal que permite solamente la adsorción de un número finito de capas y iii) A causa de los efectos de condensación capilar.

Guggenheim, Anderson y Boer (1984), corrigen el modelo BET multiplicando la actividad de agua por una constante $k < 1$, la cual interpreta como el hecho de que la energía de adsorción de la segunda capa es menor que la de licuefacción en las capas siguientes. Para derivar una expresión que tome en cuenta lo anterior, se postula que la energía de adsorción de la segunda a la novena capas difiere de la energía de licuefacción en las capas siguientes, por una cantidad d :

$$E_{2 \rightarrow 9} = E_L + d \quad (2.6)$$

Donde el valor de d también se suma a la energía de adsorción de la primera capa, el volumen adsorbido es infinito cuando la presión del adsorbato se iguala a su presión de licuefacción ($P = P_0$), bajo estas condiciones límites la cantidad adsorbida en las primeras nueve capas es despreciable comparada con la cantidad total adsorbida, $d = 0$, $x = 1$ y por tanto $x = P/P_0$, para condiciones diferentes a las límites:

$$x \cdot \exp(d) / RT = kx \quad (2.7)$$

Así, la ecuación isoterma de BET modificada bajo estos conceptos es:

$$\frac{x}{V(1 - kx)} = \frac{1}{V_m \cdot ck} + \frac{(c - 1) \cdot x}{c \cdot V_m} \quad (2.8)$$

Donde x = presión relativa (P/P_0), V es la cantidad adsorbida a la presión P , V_m la cantidad adsorbida en la monocapa, c y k son constantes, y c queda definida como:

$$c = (a_1 \cdot b_2 / a_2 \cdot b_1) \cdot \exp [(E_1 - E_L) / RT] \quad (2.9)$$

Donde, a y b son las constantes de rapidez de adsorción y desorción respectivamente y los subíndices corresponden a la primera y segunda capas.

La isoterma BET considera solamente la diferencia de energía entre las moléculas en la monocapa y las de las capas siguientes a las que le asigna un comportamiento líquido, en tanto que la isoterma de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB) postula que las moléculas de agua (adsorbato) tienen entre sí el mismo estado en las capas segunda a la novena, el cual es diferente al de las moléculas de agua en el estado líquido, con ello se introduce una segunda etapa de sorción de moléculas de adsorbato, para la que se requiere la constante k que mide la diferencia de potencial químico estándar entre la moléculas en la segunda etapa y las moléculas de líquido en el estado líquido puro. La aplicación de la isoterma GAB, se extendió ampliamente gracias a las rutinas computarizadas de resolución de cuadrados mínimos, la determinación es posible ya sea por regresión no lineal partiendo de la expresión directa de la isoterma GAB o también por regresión parabólica de la ecuación transformada de la isoterma.

La ecuación de la isoterma GAB en términos de los parámetros usados en el campo de los alimentos se presenta como:

$$U = \frac{U_m \cdot c \cdot k \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w) \cdot [1 + (c - 1) \cdot k \cdot a_w]} \quad (2.10)$$

Donde u es el contenido de agua (g de H₂O/g b.s.), $u.m.$ el contenido de agua en la monocapa, k y c constantes de GAB.

En general, el estudio de los procesos de adsorción en el campo de los alimentos sirve para diversos propósitos, particularmente la isoterma GAB tiene entre otras, las siguientes aplicaciones: aporta información valiosa sobre la vida de anaquel, mediante la determinación del contenido de humedad seguro, es decir, el que garantiza la estabilidad del producto en condiciones dadas (Jovanovich, Puppo, Giner y Añón, 2003). Constituye una parte esencial del control del proceso de secado, proporcionando información útil para el diseño del equipo de secado y para el estudio de la cinética del proceso. Permite la determinación del número de grupos polares disponibles para la sorción de agua por macromoléculas, la desnaturalización de la proteína produce un desdoblamiento de la molécula exponiendo un mayor número de sitios polares disponibles para la unión de agua.

Martínez *et al.* (1998), expresan las ecuaciones de algunos modelos matemáticos aplicados al estudio de isothermas de sorción en alimentos, entre los cuales están:

1) Modelo de BET (1938):

$$W_e = \frac{W_0 \cdot c \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot [1 + (c - 1) \cdot a_w]} \quad (2.11)$$

Donde W_e es la humedad de equilibrio, W_0 es el producto correspondiente a una capa monomolecular de agua absorbida y c representa una constante característica del material relacionada con el calor desprendido en el proceso de sorción.

De forma linealizada, la expresión anterior queda:

$$\frac{a_w}{(1 - a_w) \cdot W_e} = \frac{1}{W_0 \cdot c} + \frac{c - 1}{W_0 \cdot c} \cdot a_w \quad (2.12)$$

2) Modelo de Henderson (1952):

$$W_e = 0,01 \cdot [-\text{Log} (1 - a_w) / 10^f]^{1/n} \quad (2.13)$$

Donde n y f son parámetros característicos del producto. Se trata de un modelo empírico, cuya ecuación puede expresarse también en forma linealizada, como sigue:

$$\text{Log} \{ \text{Log} [1 / (1 - a_w)] \} = f + n \cdot \text{Log} (100 - W_e) \quad (2.14)$$

3) Modelo de Caurie (1981):

$$W_e = \text{Exp} [a_w \cdot \text{Ln} (r) - 1 / (4,5 \cdot W_s)] \quad (2.15)$$

Donde r es una constante característica del material y W_s el contenido de humedad de seguridad que proporciona máxima estabilidad al alimento deshidratado (Kg agua / Kg sólido seco). Este modelo suele dar buen

resultado para muchos alimentos en el intervalo de a_w 0 – 0,85. En forma linealizada sería:

$$\ln (1 / W_e) = 1 / (4,5 \cdot W_s) - \ln (r) \cdot a_w \quad (2.16)$$

4) Modelo de GAB (1981):

$$W_e = \frac{W_0 \cdot c \cdot k \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w) \cdot [1 + (c - 1) \cdot k \cdot a_w]} \quad (2.17)$$

Donde W_0 representa la humedad relativa del producto correspondiente a la situación en que los puntos de adsorción primarios están saturados por moléculas de agua, c es la constante de Guggenheim característica del producto y relacionada con el calor de adsorción de la monocapa y k es un factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.

$$c = c' \cdot \exp [(\Delta H_L - \Delta H_1) / R \cdot T] \quad (2.18)$$

Donde $\left\{ \begin{array}{l} \Delta H_L: \text{Calor de condensación del agua} \\ \Delta H_1: \text{Calor de adsorción de la monocapa} \\ \Delta H_2: \text{Calor de adsorción de la multicapa} \end{array} \right.$

$$k = k' \cdot \exp [(\Delta H_L - \Delta H_2) / R \cdot T] \quad (2.19)$$

$$\frac{a_w}{W_e} = \frac{1}{W_0 \cdot c \cdot k} + \frac{c - 2}{W_0 \cdot c} \cdot a_w + \frac{k(1 - c)}{W_0 \cdot c} \cdot a_w^2 \quad (2.20)$$

Para continuar con los modelos aplicables al estudio de isotermas de sorción de humedad, Torrealba (2006), considera dos modelos importantes para predecir la actividad de agua y determinar las isotermas de sorción en la harina precocida de plátano verde (*Musa paradisiaca* L.):

5) Modelo de Ratti *et al.*, (1989):

Esta ecuación permite predecir la actividad de agua en diversos alimentos frescos cuya relación incluye la dependencia con la temperatura, el cual se expresa como sigue:

$$\ln(a_w) = C_1 \cdot \exp(-C_2 X) X^{C_3} + Q_1 \cdot \exp(-Q_2 X) X^{Q_3} \ln p \quad (2.21)$$

Donde; a_w representa la actividad del agua, X es la humedad en base seca, p es la presión de vapor a la temperatura considerada, y C_1 , C_2 , C_3 , Q_1 , Q_2 , Q_3 son constantes para cada producto.

6) Modelo de Chung y Pfof (1967):

Esta ecuación se aplica mayormente en cereales y productos, se expresa de la siguiente forma:

$$m = a + b \ln(-\ln a_w) \quad (2.22)$$

Donde, m es la humedad en base seca, a_w es la actividad de agua, a y b son pendientes de intercepto.

Según Fortes y Okos (1981) la ecuación de Langmuir no se aplica a productos alimenticios. La ecuación de BET permite estimar la parte de agua adsorbida en relación con el total de agua ligada, además ofrece resultados aceptables solamente para valores de humedad relativa inferiores a 30%. La ecuación de Henderson es la que mejor expresa el contenido de humedad de equilibrio de alimentos en gamas más amplias de temperatura y humedad relativa. Las modificaciones empíricas mejoraron sustancialmente dichas ecuaciones y las hicieron aplicables a una mayor parte del abanico de temperaturas y humedades relativas. Sin embargo este autor no hace ninguna referencia a la ecuación de GAB la cual se considera de amplia aplicabilidad a las investigaciones de equilibrios de sorción de los alimentos.

Métodos experimentales para determinar el equilibrio higroscópico:

Hay dos métodos para la obtención experimental de contenidos de humedad de equilibrio: el estático y el dinámico. En el método estático, las muestras se colocan en recipientes con humedad relativa y temperatura controladas, hasta que alcancen el equilibrio higroscópico, sin que haya movimiento de aire. Existe también otro método estático, en que una muestra de granos relativamente grande se coloca en un recipiente

herméticamente cerrado dotado de un dispositivo higrosensor para determinar la humedad relativa. Cuando se alcanza el equilibrio higroscópico, no se producen variaciones apreciables en los valores de humedad relativa en el aire intersticial.

Diversas sustancias químicas poseen la característica de retirar o ceder humedad del ambiente en que se encuentran, hasta que se alcanza un estado de equilibrio. Las sustancias que así se comportan se denominan materiales higroscópicos, y el contenido de humedad, cuando están en equilibrio con la atmósfera circundante, se conoce como contenido de humedad de equilibrio.

El método dinámico consiste en hacer pasar el aire, con humedad relativa y temperatura controladas, a través de la muestra, o viceversa, hasta que no haya variación de masa en la muestra. Este método permite obtener el equilibrio higroscópico en un lapso inferior al que necesita el método estático, en las mismas condiciones de temperatura y humedad relativa.

El estado de humedad relativa se puede mantener constante al interior de recipientes herméticamente cerrados, con soluciones de ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y etilenglicol, las que mantendrán la humedad relativa constante en cualquier valor que se desee; sólo basta con variar la concentración. Se pueden emplear también soluciones saturadas de diferentes sales, las que han sido preferidas por muchos autores por las ventajas siguientes:

La misma solución de sal se puede usar con diversas temperaturas, sin grandes variaciones en el valor de la humedad relativa; b) las sales son menos corrosivas que los ácidos y causan menos daño a los operadores durante su manejo; y c) aunque el material higroscópico pierda o gane humedad en cantidades relativamente grandes, la solución permanece saturada, siempre que se deje un depósito de cristales de sal en el fondo de la solución. Un inconveniente es la dificultad de encontrar sales que abarquen toda la gama de humedad relativa que interesa, en función de la temperatura que se mantienen con soluciones de diversas sales.

Capítulo III: Marco metodológico

La producción de harinas se considera un proceso sencillo y de bajo costo que permite obtener productos con mejores características de almacenamiento, ya que al eliminar la mayor parte del agua de la fruta, se disminuye también la actividad acuosa, lo que permiten su conservación a temperatura ambiente en empaque adecuado. Las características más importantes del proceso para la producción de harinas a partir de plátano y banano es que requiere equipo sencillo, no requiere la cadena del frío, puede aplicarse con el excedente de producción, permite el aprovechamiento de la fruta de rechazo, puede apoyar al control de la oferta y precio de la materia prima.

Actualmente los híbridos de plátano y banano desarrollados por la Fundación Hondureña de Investigaciones Agrícolas (FHIA) en Honduras, se han adaptado como cultivares en varios países de Latino América, entre ellos México, principalmente en la zona del Pacífico Centro de la República, debido a la ventaja que ofrece su resistencia a la Sigatoka negra y otras enfermedades comunes de las variedades comerciales. En el estado de Colima, se han introducido mas de 30 Ha de banano y plátano FHIA como cultivares comerciales. El elevado contenido de almidón resistente, (en un rango de 79 a 95%), en los frutos verdes de banano y plátano (Englyst & Cummings, 1986; Faisant *et al.*, 1995, Lehman *et al.*, 2002; Pacheco-Delahaye & Testa, 2005), así como el conocimiento actual del impacto positivo sobre el estado de salud que se deriva de la ingestión de almidón resistente (Arvanitoyannis *et al.*, 2005; Dongowski *et al.*, 2005), ha hecho que en las últimas décadas se haya incrementado el interés para determinar las propiedades físicas, químicas y funcionales de las harinas y almidón de

banano (Bello-Pérez *et al.*, 1999). Sin embargo las investigaciones en este campo han sido principalmente con variedades tradicionalmente cultivadas como el plátano.

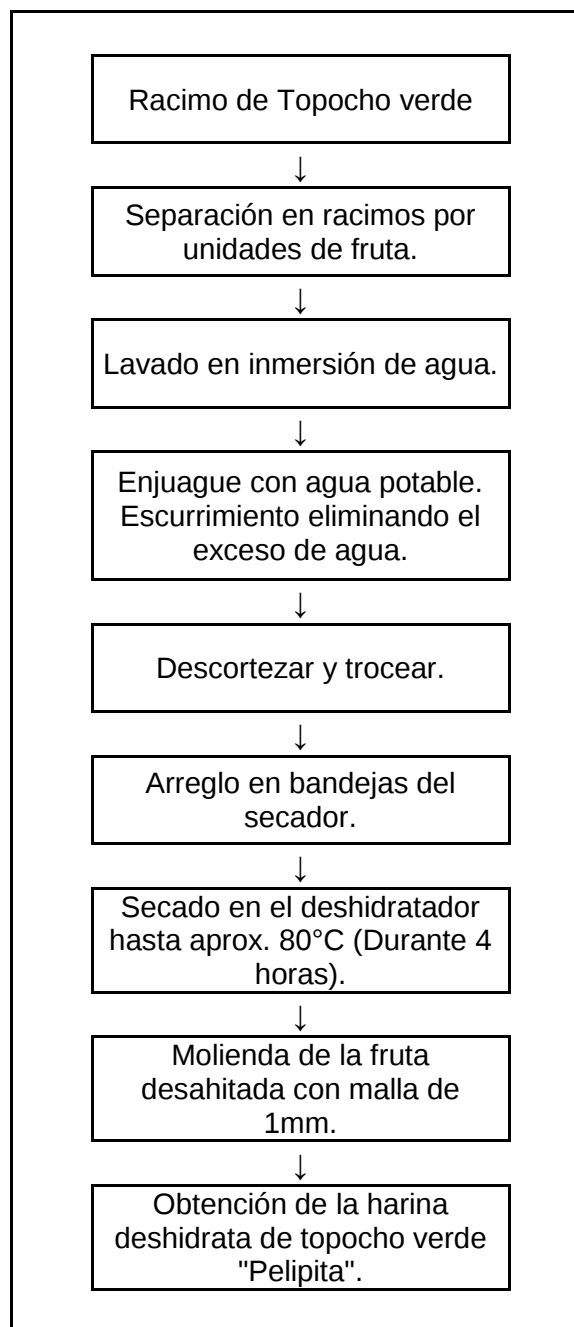


Fuente: Wickpedia, 2009.

Figura 9. Descortezado del plátano verde.

Elaboración de harina de topocho (ABB) verde “pelipita” (*Musa acuminata* x *Musa balbisiana*):

La pulpa se debe deshidratar en un horno hasta tenerla con una humedad por debajo del 14% según Pacheco (2005), después se debe proceder a molerla en un molino y almacenarla en doble bolsa de polipropileno. En la siguiente figura se muestra el procedimiento empleado para la elaboración de las harinas.



Fuente: Madrigal *et al.*, 2006 (Modificada y adaptada a la metodología experimental de este trabajo).

Figura 10. Diagrama de flujo para la producción de harina.

Análisis físico-químico de la harina de topocho verde:

Se determinó en la harina el porcentaje de contribuyentes como: proteínas, carbohidratos, grasas, fibra y cenizas en base a los procedimientos establecidos por la Association Oficial of Analysis Chemistry (AOAC) y la normas de la Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN), y estableciendo puntos de comparación con respecto a los datos obtenidos por Torrealba (2006). En el siguiente cuadro se presenta un resumen de los análisis que se realizará a la harina de topocho verde.

Cuadro 3. Análisis a realizar a la harina de topocho verde.

Análisis	Técnica / Método	Equipo	Procedimiento / Norma
Determinación de humedad.	Pérdida de masa por evaporación.	Estufa eléctrica (103 ± 2)°C.	COVENIN, 1156 -79
Determinación de proteína cruda.	Método Macro - Kjeldahl	Equipo de digestión, marca LABRONCO.	COVENIN, 1195 - 80
Determinación de grasa cruda.	Método de Soxhlet.	Equipo marca LABRONCO modelo 35001.	A.O.A.C. (1980), N° 7056.
Determinación de cenizas.	Pérdida de materia orgánica.	Mufla eléctrica (incineración de 400°C a 600°C).	COVENIN, 1783-81
Determinación de fósforo.	Digestión y calcinación del material orgánico.	Extractor Soxhlet, estufa, mufla, condensador de reflujo.	COVENIN, 1789-81
Determinación de calcio.	Digestión y calcinación del material orgánico.	Extractor Soxhlet, estufa, mufla, condensador de reflujo.	COVENIN, 1789-81

Fuente: Torrealba, (2006).

Determinación de isotermas de sorción:

Se determinaron las isotermas de sorción de humedad de la harina estableciendo cuatro temperaturas de trabajo (25, 30, 35 y 40 °C), donde se abarcó un rango de actividad de agua de 0,202 a 0,835 (Torrealba, 2006). Este método basado en los trabajos de Landaeta (2005) y Torrealba (2006) consistió en utilizar recipientes de plástico (de capacidad 250 cc) en los cuales se colocaron diversas soluciones salinas saturadas, para obtener micro atmósferas de humedad relativa fija a las temperaturas de estudio.

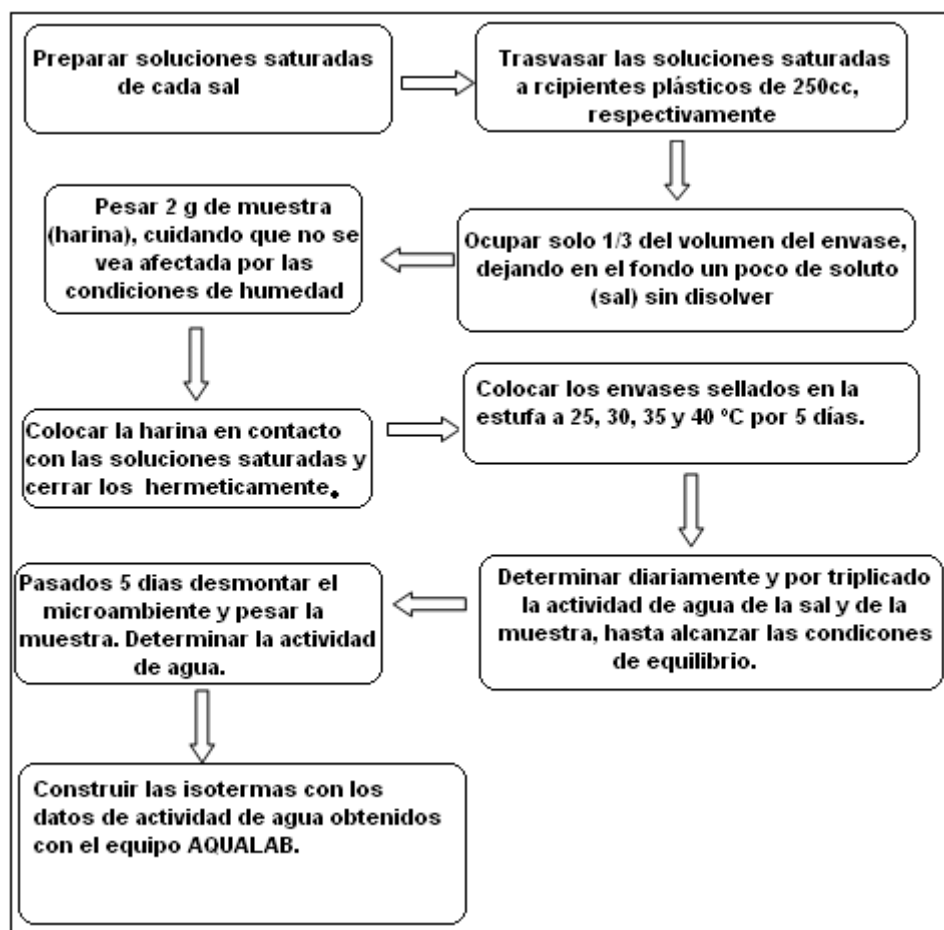
Las sales utilizadas en estudio fueron las siguientes:

Cuadro 4. Sales para formar soluciones salinas y su actividad acuosa respectiva.

SAL	Actividad de agua (a_w)
Acetato de potasio ($KC_2H_3O_2$)	0,200
Cloruro de magnesio ($MgCl_2$)	0,327
Carbonato de potasio (K_2CO_3)	0,431
Nitrato de magnesio ($MgNO_3$)	0,528
Cloruro de cobalto ($CoCl_2$)	0,649
Cloruro de sodio ($NaCl$)	0,752
Cloruro de potasio (KCl)	0,843

Fuente: Torrealba, 2006.

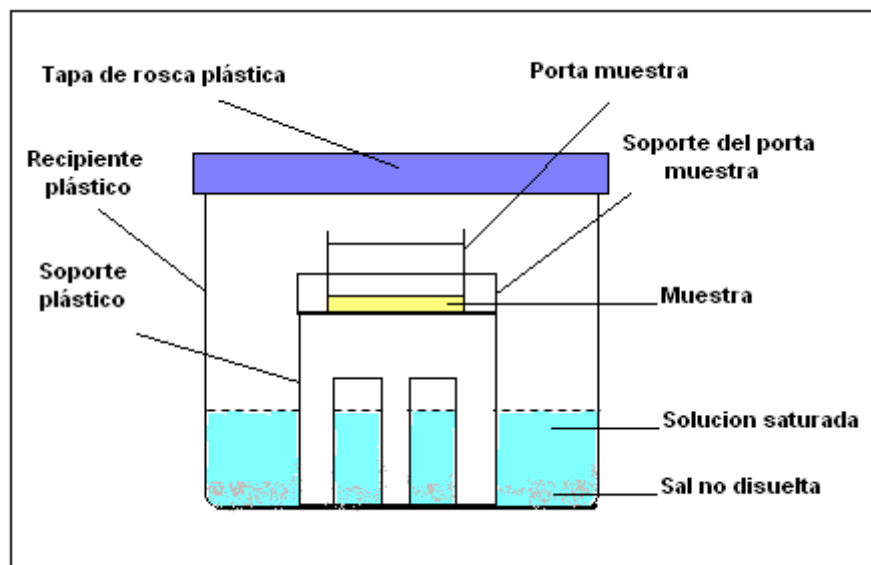
La metodología seguida para establecer los sistemas de equilibrio de sorción se presenta esquematizada a continuación:



Fuente: Adaptado de Torrealba, (2006).

Figura 11. Metodología para preparar los sistemas de adsorción de humedad de la harina.

El equipo experimental utilizado para determinar las isotermas de sorción en la harina precocida de topocho (ABB) “pelipita”, consistió en un vaso de plástico con su respectiva tapa dentro del cual con la ayuda de un soporte de plástico y un porta muestra soportado, se introdujo la solución salina respectiva y la muestra de harina precocida. Este sistema se visualiza mejor en la siguiente figura:



Fuente: Torrealba, (2006).

Figura 12. Equipo experimental para la determinación de las isotermas de sorción en la muestra de harina (Adaptado de Torrealba, 2006).

Diseño estadístico:

Se utilizó un diseño factorial completamente aleatorizado, para obtener los datos experimentales, en el cual se consideraron los siguientes factores: soluciones salinas saturadas a 7 niveles, temperatura a 4 niveles, y harina precocida de topocho (ABB) verde a 1 nivel. A cuyos datos obtenidos se les aplicó un análisis de varianza (ANAVAR), empleando el software estadístico: Stata versión 10.0, con este análisis se obtuvieron las pruebas de significancia (F) de las respuestas generadas en los tratamientos, definiendo las variables: actividad de agua con Y_1 y humedad en base seca con Y_2 . Luego estableciendo una prueba de comparación de medias LSD (Least Significal Difference) del programa Stata versión 10.0, se especificaron cuales de los tratamientos presentaron mayor significancia en el ensayo (Torrealba, 2006).

Ajuste de los datos experimentales a las ecuaciones a utilizar:

Para realizar el ajuste de los datos experimentales se utilizaran las ecuaciones de BET (Brunauer-Emmet-Teller, 1938); y GAB (Guggenheim-Anderson-Boer, 1984); Ratti *et al.* (1989) y Chung y Pfof (1967), las cuales proporcionaron una mejor correlación en la determinación de isothermas de sorción de diferentes productos y en la predicción de la actividad de agua en variados tipos de alimentos.

Con uso del programa estadístico Stata versión 10.0, se obtiene el coeficiente de determinación (R^2) de los modelos propuestos y los

parámetros o coeficientes de cada ecuación, de esta forma se establecieron el mejor ajuste de los datos experimentales. Las gráficas para cada modelo matemático, se obtuvieron utilizando el software PASW Statistic PLUS versión 18, para cada temperatura de trabajo correspondiente.

Capítulo IV: Discusión de resultados

Análisis nutricional de la harina precocida de topocho verde “pelipita”:

De acuerdo a los análisis realizados a la harina de topocho verde “pelipita” obtenida experimentalmente, se tuvieron los siguientes resultados:

Cuadro 5. Análisis bromatológico de la Harina de Topocho Verde “Pelipita” ABB (*Musa acuminata* X *Musa balbisiana*)

Procedencia	Humedad (%)	Grasa (%)	Proteína (%)	Cenizas (%)	Calcio (%)	Fósforo (%)
LAB - ALG	13,918	0,347	3,524	2,494	0,078	0,094

Fuente: Resultados suministrados por Laboratorios ALG- Avícola La Guásima, Planta Tocuyito Edo. Carabobo.

En cuanto al contenido de humedad de la harina precocida resultó tener un bajo porcentaje en comparación al valor dado por Pacheco (2005), por lo que el método de secado de la pulpa empleado resultó satisfactorio, siendo confiable para realizar deshidrataciones de vegetales en general. Refiriéndonos al valor obtenido en el análisis de grasa se comprueba que el topocho verde no cambió su composición ya que es similar para el

porcentaje de grasa sugerido por Simmonds (1973), para las musáceas en general.

Para las proteínas se puede afirmar que la harina de topocho verde conserva un alto valor nutricional similar al valor obtenido por Torrealba (2006), para la harina de plátano verde (2,30%); al igual que el calcio se mantuvo en un valor cercano en contraposición a la pulpa de banano (0,080 %), sin embargo no podemos decir lo mismo para el aporte del fósforo el cual presentó un valor bastante inferior, en comparación a los valores nutricionales (0,292 %), proporcionados por Simmonds (1973).

Análisis estadístico de los datos experimentales:

Aplicando un tratamiento estadístico a los datos experimentales obtenidos, trabajando bajo un diseño factorial completamente aleatorizado, con un esquema de tratamiento de 3 factores: soluciones saturadas (a_w teóricos), a 7 niveles con temperaturas a 4 niveles (25, 30, 35 y 40 °C), y un solo nivel de harina precocida de topocho verde. De allí se obtuvieron los datos de actividad de agua y posteriormente la humedad de la harina precocida, cuyos resultados se muestran en el anexo 1. En cuanto al tratamiento estadístico al analizar los datos obtenidos, se encontró que para W normal el valor resultante indica que los resultados pueden considerarse dentro de la curva de distribución normal, ubicándose al extremo derecho, esto sin embargo según el valor obtenido para el tratamiento de Curtosis corresponde a una distribución plana comparada con una curva de distribución normal, dado por el valor negativo obtenido.

Cuadro 6. Análisis estadístico de los datos experimentales.

Parámetros	Variable (Y)	
	Aw (Y1)	Humedad (Y2)
N	84	84
Media	0,521019355	0,050517742
Desviación estándar	0,224721322	0,020637669
varianza	0,065852332	0,000566571
Mínimo	0,12	0,011
Máximo	0,921	0,0923
Curtosis	-1,201085579	-1,273131507
W: Normal	1	1
Suma	30,5297	3,1321

Fuente: Determinaciones del programa Stata versión 10.0

En cuanto al análisis de varianza de los datos experimentales, de acuerdo a los resultados para la prueba F muestra la probabilidad doble de que las varianzas de los argumentos matriz 1(actividad de agua), y matriz 2 (humedad); no presenten diferencias significativas, por lo que es posible tratar ambos resultados para ajustar las isothermas de sorción de humedad de la harina de topocho verde.

Cuadro 7. Análisis de varianza de los datos experimentales.

Fuente de variación	G. L.	SS	MS	F
Temperatura	3	0,00000189	0,00000063	0,2483514
Actividad de agua	6	0,18895748	3,14833E-06	1,2410999
Residual	2	0,00000067	0,000000335	0,1320598
Error relativo medio	72	0,00018264	2,53673E-06	
TOTAL	83			

Fuente: Determinaciones del programa Stata versión 10.0

Análisis de regresión no lineal aplicado a los datos de sorción de humedad:

Los valores obtenidos referentes a la actividad de agua y a la humedad de la harina precocida de topocho verde Pelipita ABB, fueron sometidos a un análisis de regresión no lineal empleando para ello las ecuaciones de Chung y Pfof (1967), Ratti *et al* (1989), GAB (Guggenheim *et al*, 1984) y BET (Brunauer *et al*, 1938), los cuales se presentan en el anexo 1. Del modelado de las isotermas resultaron las siguientes gráficas para cada una de las ecuaciones:

1.- Ecuación de Chung y Pfof (1967):

Los resultados dados mediante el uso de esta ecuación se adaptaron bastante bien a las cuatro temperaturas de trabajo donde se obtuvo un mejor ajuste a los 35°C con un R^2 de 0,991, sin embargo a las demás temperaturas se mantuvo un buen valor para el coeficiente de correlación lineal R^2 , manteniéndose entre 0,977 a 0,988, tal como se observa en la siguiente tabla:

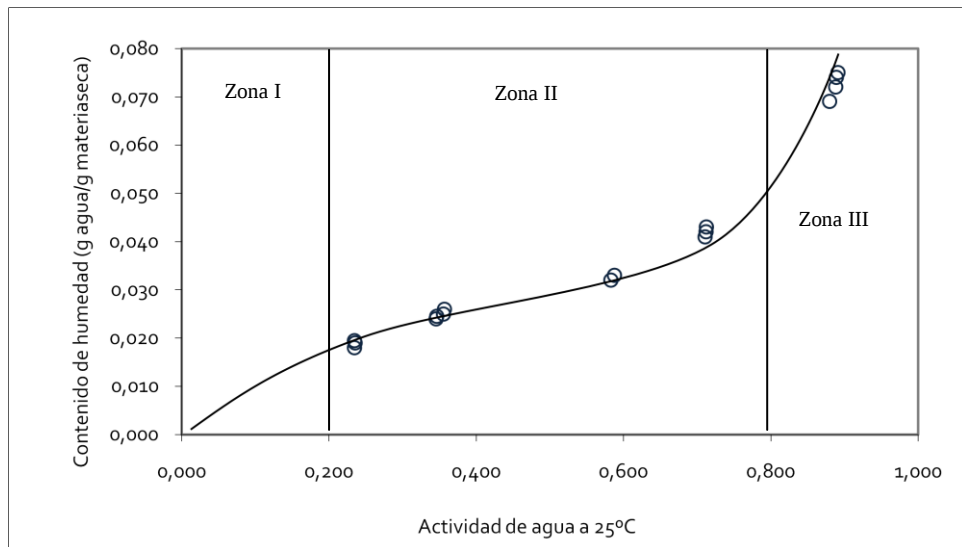
Cuadro 8. Parámetros para la ecuación de Chung y Pfof (1967), para las isothermas de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a diferentes temperaturas.

Parámetros			
Temperatura °C	a	b	R2
25	-0,892	-14,77	0,978
30	-0,935	-14,74	0,988
35	-0,939	-14,73	0,991
40	-0,942	-14,78	0,977

Fuente: Determinaciones del programa Stata versión 10.0

Los parámetros “a” y “b” se determinaron mediante el uso del programa estadístico Stata versión 10.0, donde el criterio de convergencia se estableció a partir de 0,0001; para las cuatro temperaturas de trabajo.

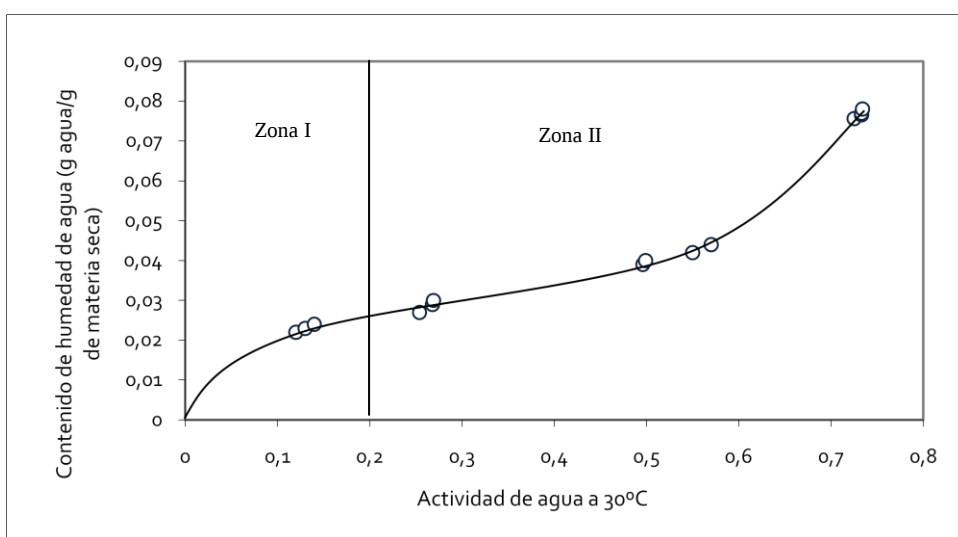
Las gráficas para cada temperatura se obtuvieron mediante el programa estadístico PASW Statistics PLUS versión 18, a partir de los resultados obtenidos. En las mismas se observa el comportamiento del contenido de humedad en la harina, conforme aumenta la actividad a una temperatura dada.



Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

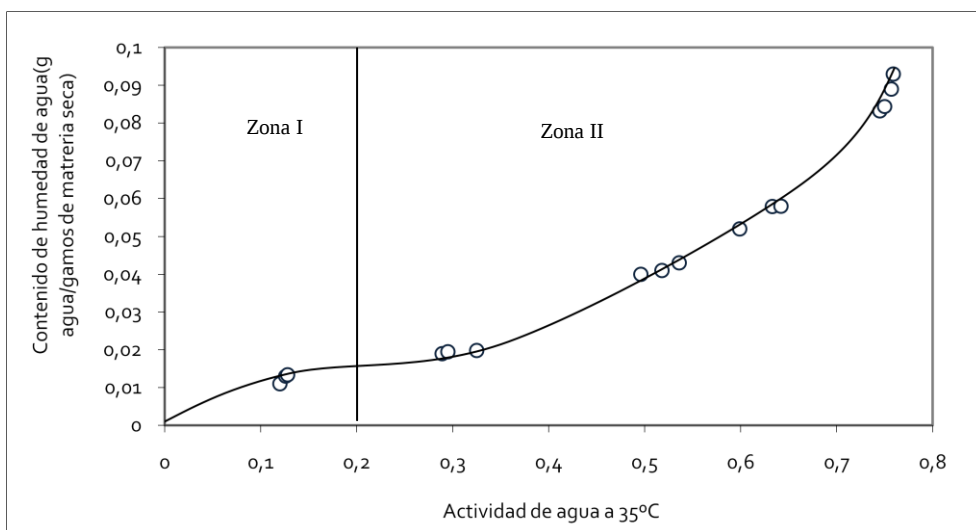
Figura 13. Isotherma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Chung y Pfof (1967), a 25 °C.

Esta ecuación demostró tener un buen ajuste aplicado a los datos experimentales para todas las temperaturas de estudio, tal como lo obtuvo Torrealba (2006), para el estudio de la harina de plátano verde. Esto convierte a la ecuación de Chung y Pfof (1967), en una importante herramienta para el estudio de harinas precocidas derivadas de las musáceas.



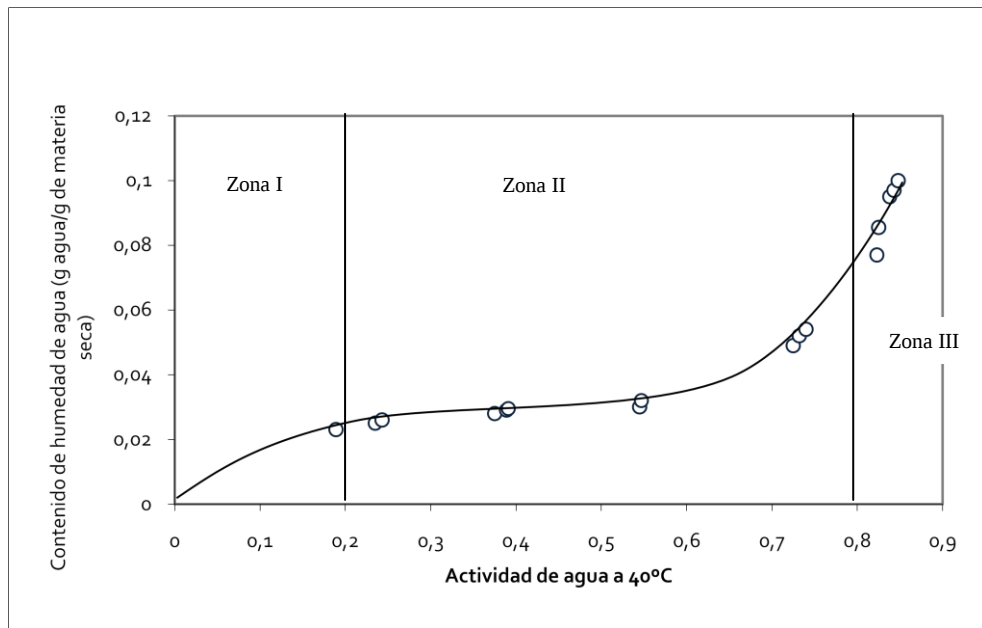
Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

Figura 14. Isotherma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Chung y Pfof (1967), a 30 °C.



Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

Figura 15. Isotherma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Chung y Pfof (1967), a 35 °C.



Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

Figura 16. Isotherma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Chung y Pfof (1967), a 40 °C.

Todas las gráficas ajustadas por la ecuación de Chung y Pfof (1967), presentaron un comportamiento sigmoideal cercano a la isoterma de tipo II según la clasificación de las isoterma la cual es característica de productos solubles, Tolaba *et al* (2004).

2.- Ecuación de Ratti et al (1989):

El estudio de la actividad de agua en la harina precocida de topocho verde, empleando esta ecuación obtuvo un buen ajuste de los datos experimentales. Los parámetros para la ecuación se obtuvieron empleando el programa estadístico Stata versión 10.0, donde a su vez se

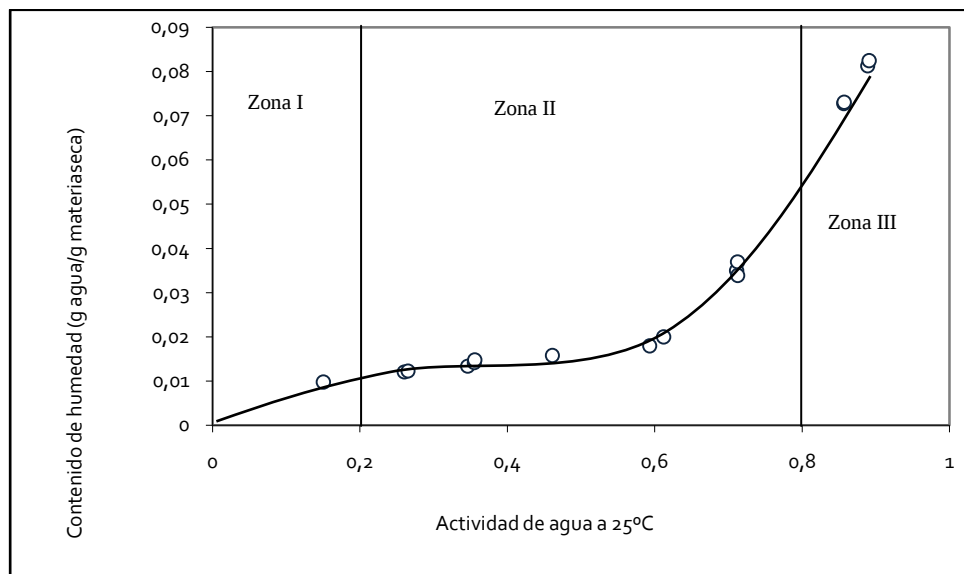
obtuvieron excelentes valores para el coeficiente de correlación lineal R^2 , resultando un mejor ajuste a los 40°C, como se muestra a continuación:

Cuadro 9. Parámetros para la ecuación de Ratti (1989), para las isotermas de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Parámetros						
	C1	C2	C3	Q1	Q2	Q3	R2
25	-0,071	103,15	0,000	-0,031	11,810	0,000	0,992
30	-0,891	19,883	0,000	-0,099	-5,980	0,000	0,993
35	-0,922	17,582	0,000	-0,038	-16,930	0,000	0,991
40	-0,986	16,171	0,000	-0,029	-17,780	0,000	0,995

Fuente: Determinaciones del programa Stata versión 10.0

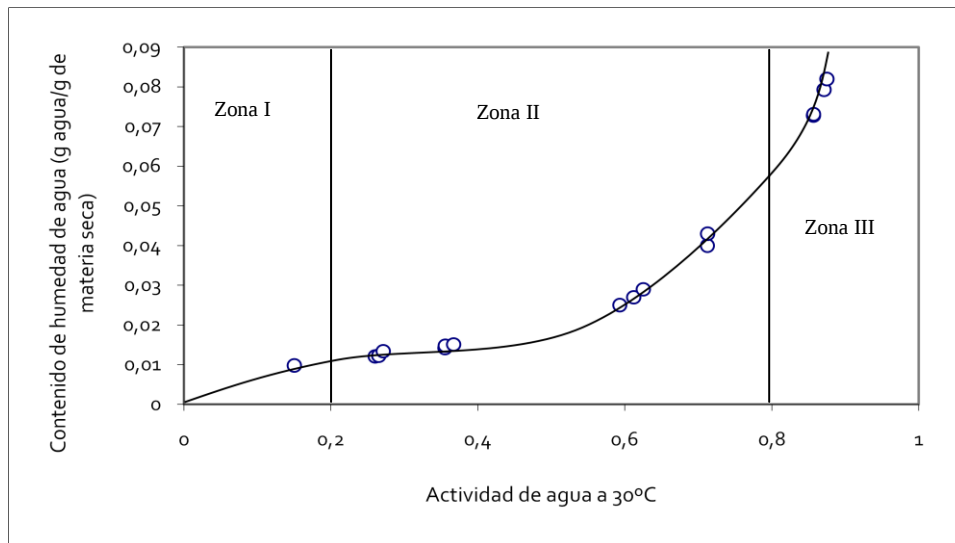
Empleando el programa PASW Statistics v-18 se lograron obtener las gráficas correspondientes a cada temperatura estudiada (25, 30, 35 y 40 °C), donde se observó para todos los casos el comportamiento particular de una isoterma tipo II con comportamiento sigmoide, la cual muestra una tendencia asintótica conforme a la actividad de agua se acerca a la unidad Tolaba *et al* (2004), este mismo comportamiento se observó en las gráficas obtenidas para la ecuación de Chung y Pfof (1967).



Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

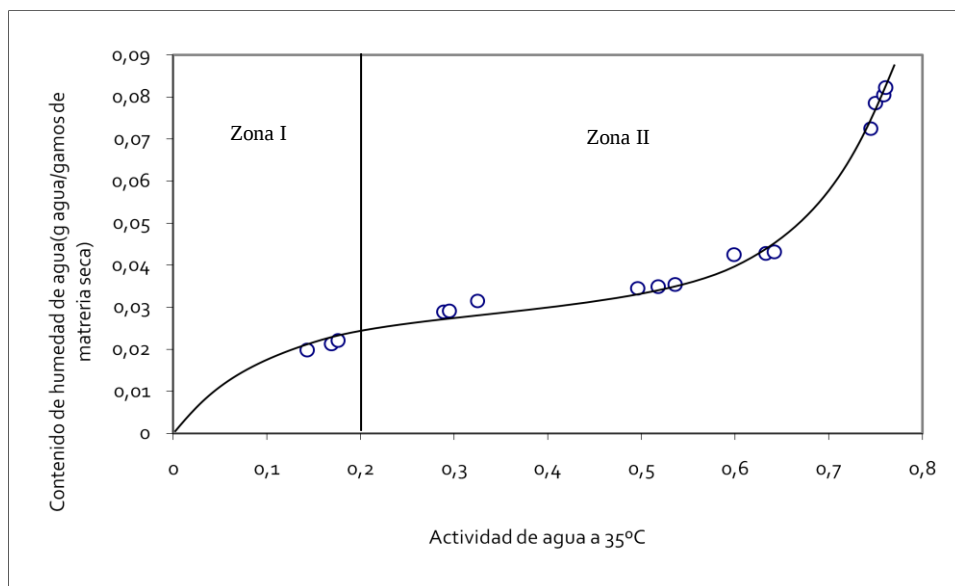
Figura 17. Isotherma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Ratti (1989), a 25 °C.

Gráficamente se pudo observar que la ecuación de Ratti permite obtener un buen ajuste de los datos experimentales, lo cual se refleja en los trabajos realizados por Torrealba (2006), además de que los resultados para el R^2 obtenidos mediante esta ecuación predeterminan el comportamiento que se observa en las curvas donde se ve que existe una relación directa entre la actividad de agua y el contenido de agua de la harina, mostrando que cuando una aumenta la otra lo hace en proporción constante, lo que significa que entre ellas existe una correlación positiva casi perfecta para todas las temperaturas de trabajo donde R^2 se mantuvo superior a 0,99.



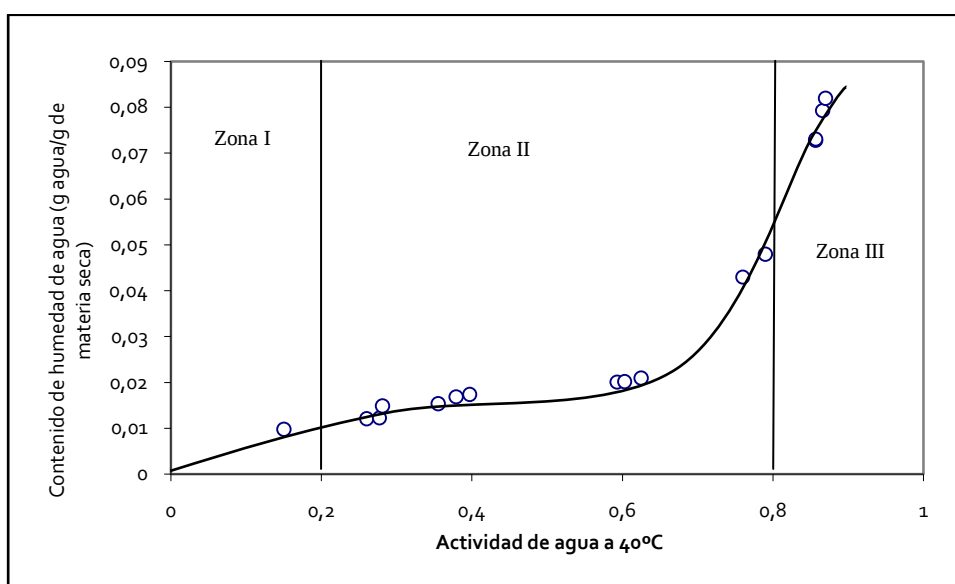
Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

Figura 18. Isotherma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Ratti (1989), a 30 °C.



Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

Figura 19. Isotherma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Ratti (1989), a 35 °C.



Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

Figura 20. Isotherma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de Ratti (1989), a 40 °C.

3.- Ecuación de GAB (Guggenheim et al, 1984):

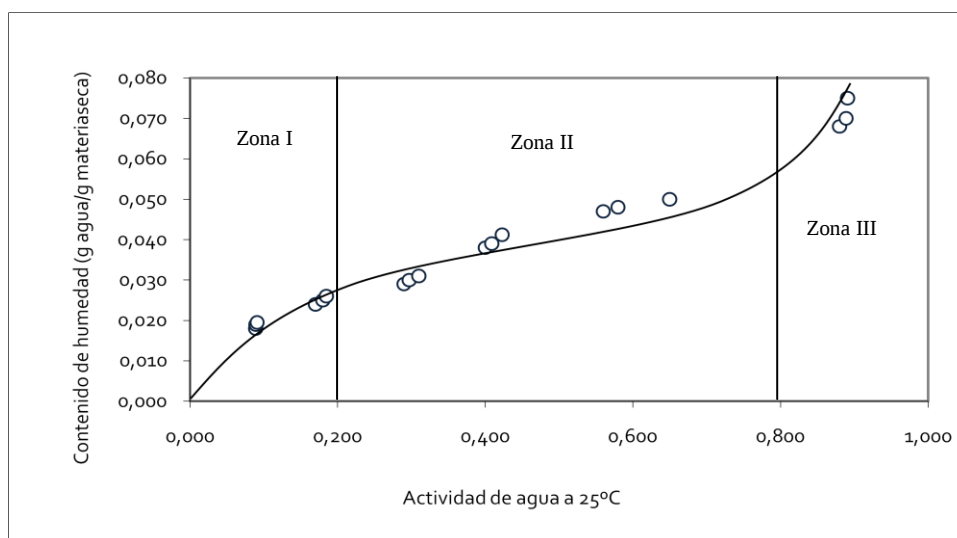
Los parámetros para esta ecuación se obtuvieron empleando el programa estadístico Stata versión 10.0, tal como se muestra a continuación:

Cuadro 10. Parámetros para la ecuación de GAB (1984), para las isotermas de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a diferentes temperaturas.

Parámetros							
T (°C)	α	β	γ	m1	C	K	R2
25	-1425,6	1856,5	-551,4	0,0182	1,39	-0,68	0,966
30	-1395,6	2010,1	-587,9	0,0172	1,31	-0,56	0,956
35	-879,6	1149,7	-342,6	0,0079	1,24	-0,79	0,965
40	-649,8	947,9	-295,3	0,0187	1,2	-0,86	0,960

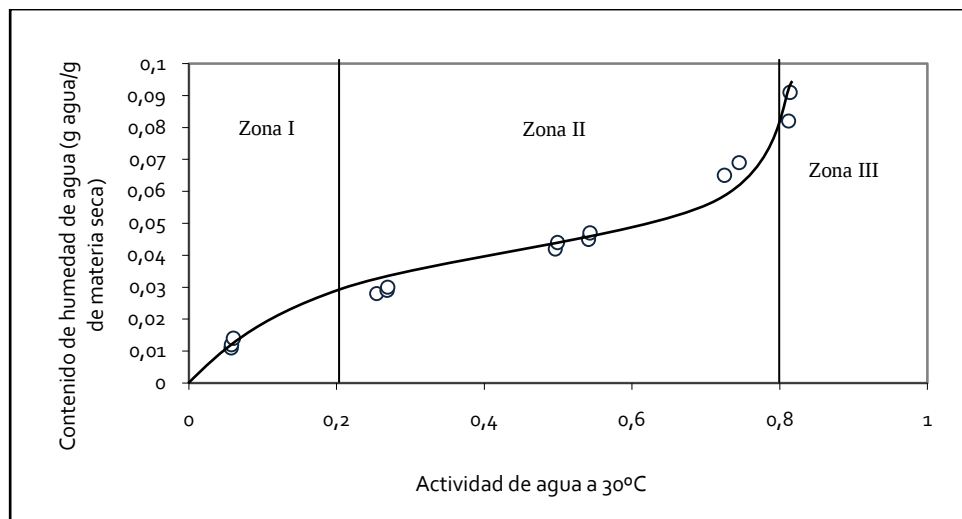
Fuente: Determinaciones del programa Stata versión 10.0

Para esta ecuación y con el uso del programa estadístico PASW Statistics versión 18, se obtuvieron las isotermas correspondientes las cuales se encontraron dentro de las isotermas de tipo II, manteniendo un comportamiento sigmoidal.



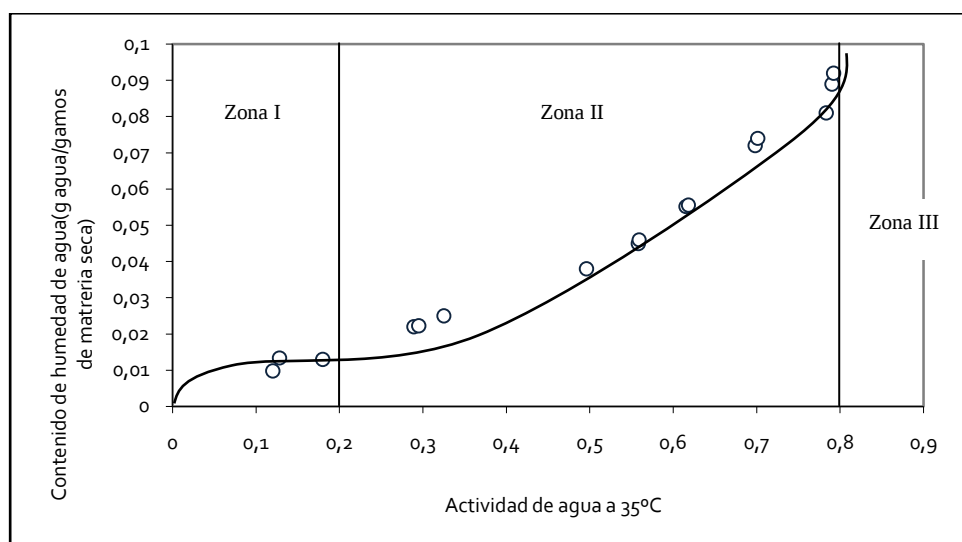
Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

Figura 21. Isotherma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de GAB (1984), a 25 °C.



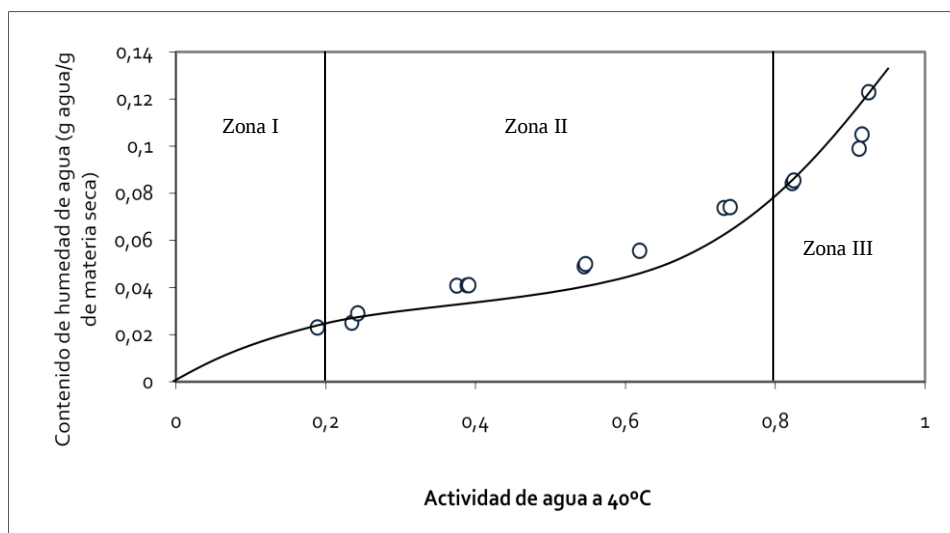
Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

Figura 22. Isotherma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de GAB (1984), a 30 °C.



Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

Figura 23. Isotherma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de GAB (1984), a 35 °C.



Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

Figura 24. Isotherma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de GAB (1984), a 40 °C.

La ecuación de GAB a pesar de ser utilizada ampliamente en estudios de harinas precocidas en general no obtuvo resultados tan satisfactorios como para las ecuaciones de Ratti *et al* (1989) y Chung y Pfof (1967), sin embargo los parámetros estadísticos obtenidos para la misma con el uso del programa Stata versión 10.0, arrojaron resultados bastante aceptables para el coeficiente de correlación lineal R^2 con valores de 0,956 a 0,966; donde el mejor ajuste se observó a la temperatura de 25°C, similares a los obtenidos por Vega, Andrés y Fito (2005), en el estudio realizado al pimiento rojo (*Capsicum annum* L. cv Lamuyo). Sin embargo Torrealba (2006), una vez más obtuvo un comportamiento similar para la harina precocida de plátano verde (*Musa paradisíaca* L.).

4.- Ecuación de BET (1938):

Para esta ecuación los resultados no fueron lo suficientemente buenos como para lograr un buen ajuste de los datos experimentales, esto se refleja en los resultados obtenidos mediante el programa estadístico Stata v-10 para los parámetros requeridos por la ecuación de BET (Brunauer-Emmet-Teller, 1938), aún más para el coeficiente de correlación lineal R^2 con valores por debajo de 0,415 se cree se debe a las limitaciones que presenta dicha ecuación para abarcar el rango de actividad de agua aplicado a los alimentos.

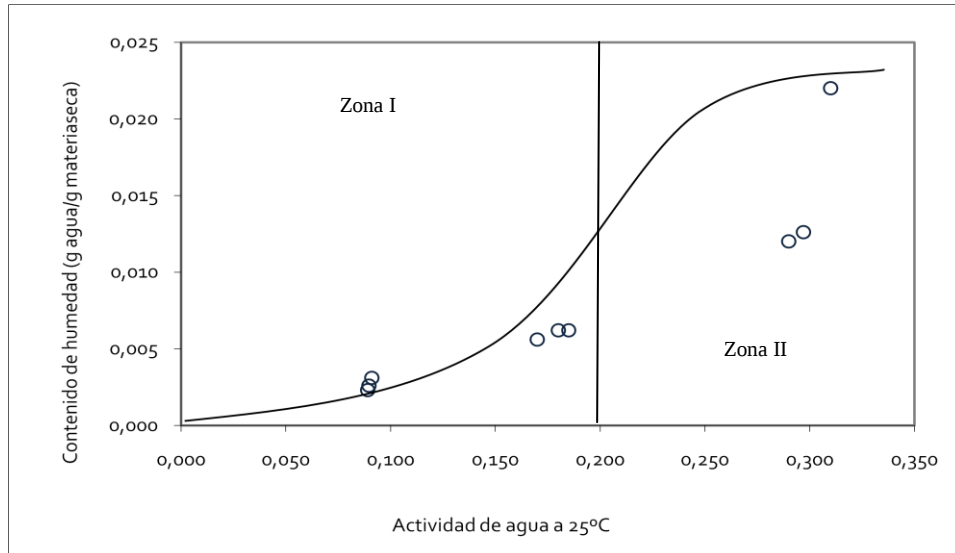
Cuadro 11. Parámetros para la ecuación de BET (1938), para las isothermas de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Pendiente (m)	Intercepto (b)	C	m1	R2
25	20,1	50,7	1,44	0,0148	0,234
30	40,6	55,7	1,66	0,011	0,415
35	73,5	59,18	3,99	0,0044	0,373
40	96,2	63,15	4,13	0,0026	0,211

Fuente: Determinaciones del programa Stata versión 10.0

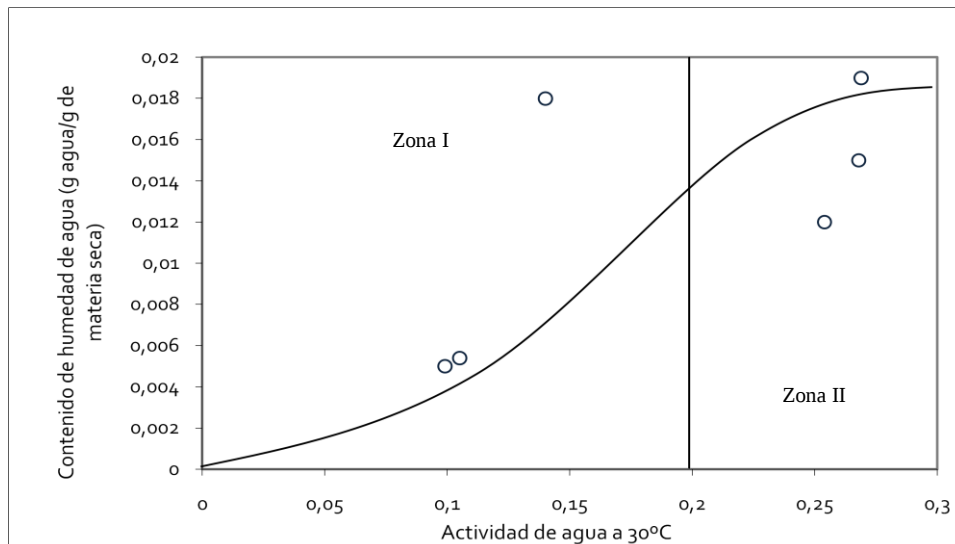
Las gráficas obtenidas con esta ecuación presentaron un comportamiento típico de la isoterma de BET, que sería de tipo V según la

clasificación de las isothermas, donde se representa la adsorción multimolecular.



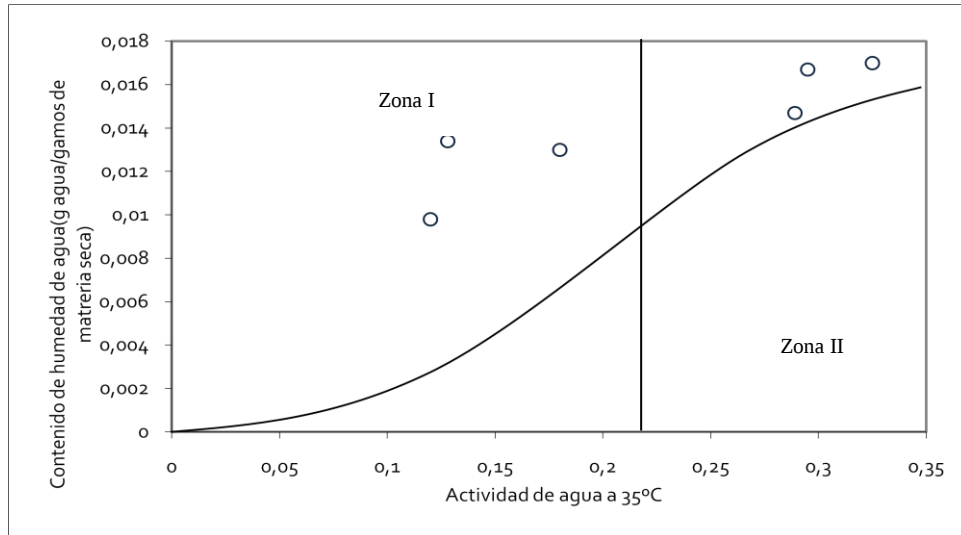
Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

Figura 25. Isotherma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de BET (1938), a 25 °C.



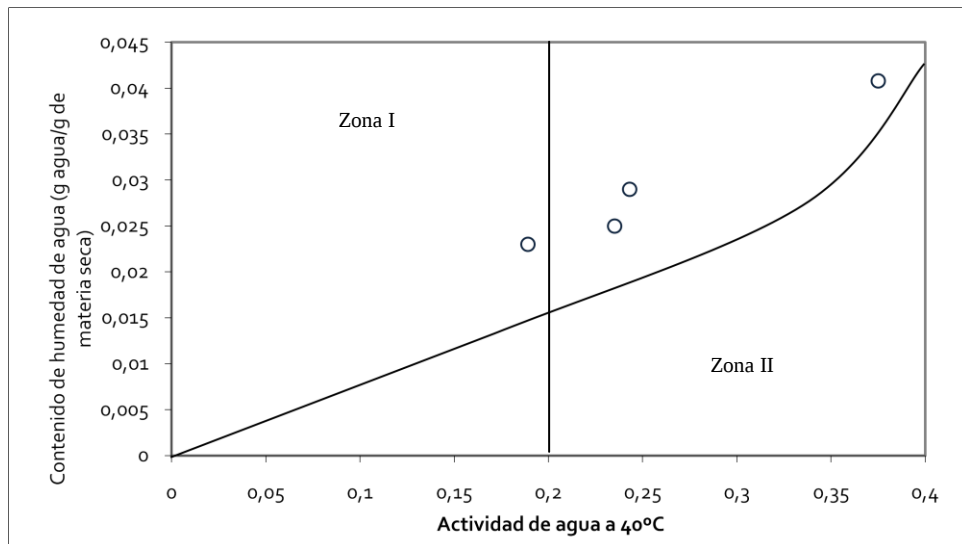
Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

Figura 26. Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de BET (1938), a 30 °C.



Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

Figura 27. Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de BET (1938), a 35 °C.



Fuente: Determinaciones del programa PASW Statistics PLUS versión 18.

Figura 28. Isoterma de adsorción de humedad de harina precocida de topocho verde, ajustada a la ecuación de BET (1938), a 40 °C.

A pesar de que muchos investigadores han empleado esta ecuación para obtener las isotermas de sorción de humedad de diferentes productos alimenticios, la ecuación de BET es más aplicable para obtener el valor de la monocapa. Sin embargo los resultados mostrados en la tabla anterior sugieren un comportamiento cualitativo para esta ecuación, donde los valores dados para el parámetro “c” al ser mayores que 1, corroboran el hecho de que la primera capa está más fuertemente favorecida en relación con las capas subsiguientes, tal como se aprecia para 25 y 30°C, para las otras temperaturas se piensa que los valores del parámetro “c” no son confiables, lo que representa una limitante para la ecuación de BET en su aplicación al estudio de los alimentos Torrealba (2006).

Determinación del valor de la monocapa:

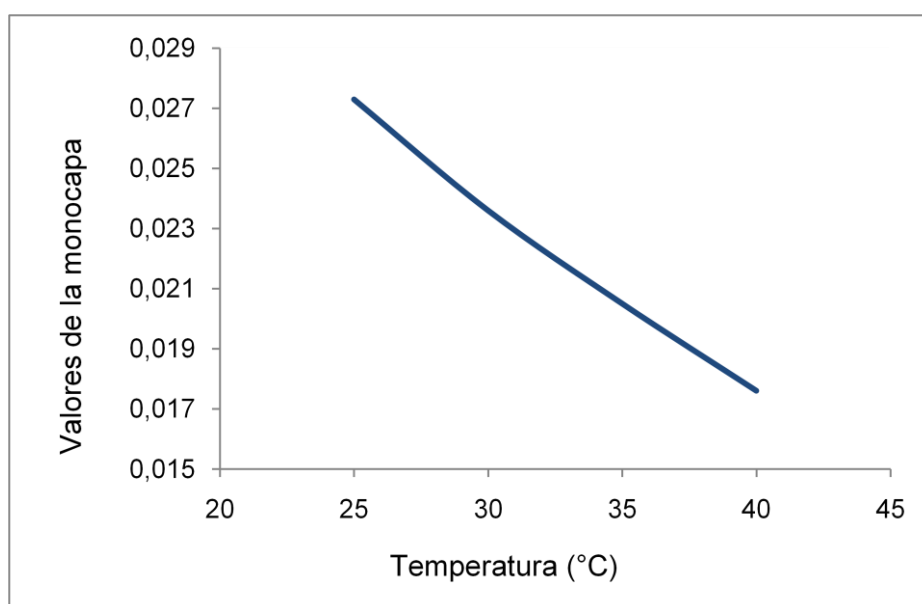
Para obtener el valor de la monocapa a las cuatro temperaturas de trabajo se emplearon las ecuaciones de GAB y BET, empleando los datos de los cuadros 9 y 10 empleando una calculadora Hp 49 G en modo para inserción de ecuaciones matemáticas se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro 12. Cantidad de agua en la monocapa (m_1 o m_0), y a_w crítica de la harina precocida de plátano verde a diferentes temperaturas, empleando las ecuaciones de GAB (1984) y BET (1938).

Temperatura (°C)	GAB		BET	
	m_1	a_w crítica	m_1	a_w crítica
25	0,0273	0,4271	0,0136	0,572
30	0,0236	0,396	0,0107	0,531
35	0,0205	0,339	0,0027	0,492
40	0,0176	0,307	0,0011	0,463

Fuente: Determinaciones de ecuaciones lineales con calculadora HP 49 G.

Según estos valores obtenidos y empleando el programa de cálculo Microsoft Excel Office para Windows seven, se graficó la dependencia de los valores obtenidos con la ecuación de GAB para la monocapa con respecto a las temperaturas de trabajo, como se muestra a continuación:



Fuente: Determinaciones con el programa de cálculo Microsoft Excel Office para Windows seven.

Figura 29. Variaciones de la monocapa de los datos de sorción de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita”.

Con respecto a la ecuación de BET esta sólo supone que la energía de adsorción corresponde sólo a la primera capa, considerando solamente la diferencia de energía entre las moléculas de la primera capa y las de las capas subsiguientes, en tanto que la ecuación de GAB considera la adsorción de la segunda a la novena capa, el cual es diferente a la energía de las moléculas de agua en estado líquido.

A su vez se puede apreciar que el valor de la monocapa disminuye referente aumenta la temperatura, lo que confirma que la harina elaborada de topocho verde “Pelipita” ABB, es un producto deshidratado cuya tasa de deterioro es relativamente baja.

CONCLUSIONES

La harina de topocho verde “Pelipita” ABB (*Musa acuminata* x *Musa balbisiana*), representa un producto alimenticio bajo en grasa y humedad, rico en proteínas; por lo que podría ser recomendado como base para elaboración de alimentos deshidratados empleados en regímenes especiales de alimentación. A su vez se demostró que el proceso de elaboración de la misma es sencillo, rápido permitiendo conservar el producto por mayor tiempo almacenado.

La determinación experimental de las isothermas de sorción de humedad de la harina deshidratada, representa una relación directa entre la actividad de agua (a_w), y el contenido de humedad de equilibrio a una temperatura determinada; lo que se convierte en una herramienta sumamente importante para predecir el tiempo de vida útil y las condiciones de almacenamiento más adecuadas para el producto.

Las isothermas obtenidas para los resultados de la harina de topocho verde “Pelipita” conservaron una forma sigmoideal y se mantuvieron dentro de la clasificación de isothermas de tipo II, típica de productos alimenticios solubles, con tendencia asintótica conforme la actividad de agua se acerca a la unidad.

Sin embargo este comportamiento no se dio para el ajuste realizado empleando la ecuación de BET la cual se encontró clasificada dentro de las isothermas tipo V donde se observa el fenómeno de adsorción multimolecular después de la formación de la monocapa, lo que hizo restringido la aplicación de esta ecuación a este estudio en particular.

Continuando con el ajuste de las isothermas de adsorción dado por los modelos matemáticos empleados, se obtuvo que la ecuación de Ratti *et al*

(1989) presentó el mejor ajuste con coeficiente de correlación lineal superiores a 0,991 hasta 0,995 para todas las temperaturas de trabajo. Sin embargo la ecuación de Chung y Pfof (1967), también representa una buena alternativa para este tipo de estudios ya que arrojó buenos valores para el R^2 ubicados desde 0,977 a 0,991. Lo cual indica que estos modelos matemáticos son altamente confiables para el estudio de isotermas de sorción de humedad en alimentos deshidratados, los cuales garantizan abarcar el rango de actividad de agua aplicable en alimentos de 0,1 a 0,9 para a_w .

A medida que aumenta la temperatura disminuye el valor de la monocapa, los valores para la misma fueron obtenidos por las ecuaciones de BET(1938) y de GAB (1946), donde se obtuvo un rango entre 0,0273 a 0,0011 lo que equivale a 2,73 a 0,11 g de agua por cada 100 g de sustancia seca; donde los valores de la monocapa para la mayor parte de los alimentos deshidratados se encuentran de 3 a 10 g de agua por cada 100 g de sustancia seca representando el contenido de humedad al cual cada grupo iónico polar se encuentra unido a una molécula de agua, Torrealba (2006). De este punto se puede partir para la determinación de los grupos polares disponibles para la sorción de agua por macromoléculas existentes en la harina de topocho verde “Pelipita” ABB.

Los resultados obtenidos en el presente estudio son fundamentales en la predicción de la estabilidad de la harina de topocho verde “Pelipita” ABB para efectos de conservación y almacenamiento.

RECOMENDACIONES

Dentro de las limitaciones que delimitaron el presente estudio y bajo la extensión investigativa que se pudiera realizar a este trabajo se consideran las siguientes recomendaciones:

Realizar un número mayor de repeticiones experimentales, para utilizarlos como punto de comparación, en la construcción y modelado de las isotermas de sorción de humedad.

Determinar el calor isostérico de sorción de la harina precocida de topocho verde “Pelipita” ABB, para así obtener el valor de la energía requerida por la harina para alcanzar el equilibrio sorcional, trabajando bajo los esquemas de la ecuación de Clausius-Clapeyron en su forma integrada.

Realizar la caracterización de la harina con el fin de estudiar la desnaturalización de las proteínas responsables del desdoblamiento molecular, las cuales son las responsables de exponer el mayor número de sitios polares disponibles para la unión del agua, durante el fenómeno de adsorción de humedad en la harina precocida de topocho verde “Pelipita” ABB.

Evaluar el comportamiento de la harina de topocho “Pelipita” ABB (*Musa acuminata* x *Musa balbisiana*), mezclada en diferentes proporciones con harina de plátano verde (*Musa paradisiaca* L.), con el fin de estudiar la factibilidad de del uso de estos dos productos combinados como base para la realización de alimentos deshidratados.

Realizar mediante un análisis por resonancia magnética nuclear de protones (RMN de protones), la movilidad del agua en la harina de topocho verde, ya que actualmente esta técnica representa un estudio más sofisticado aportando resultados más confiables y exactos para evaluación de alimentos deshidratados.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, F. (1986). "Comportamiento del clon topocho pelipita (Musa grupo ABB) en los llanos occidentales de Venezuela". FONIAP. *Rev. Agronomía Tropical*. 36 (1-3): 21-36.
- Al-muhtaseb, A. H.; Mchimn, W. A. M.; Magee, T. R. A. (2004). "Water sorption isotherm of starch powders Part 1: mathematical description of experimental data". *Journal of Food Engineering*. 61 (3): 297-307.
- Angarita, A.; Perea, M. (1998). "Micropropagación de plátanos y bananos". Instituto Colombiano Agropecuario. Universidad Nacional de Colombia. *Inf. Cultivo de tejidos en la Agricultura*. Cap. 22: 496-512.
- A. O. A. C. (1980). "Oficial *Methods of análisis*". Association of Oficial Analytical Chemist. 16th ed. Arlinton Va. U. S. A.
- Arana, E.; Iturbe, G. (2007). "Determinación de las isothermas d 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. 1ra. Parte: Determinación de las isothermas y su ajuste a modelos matemáticos". México. *Rev. Tec. Aliment*. 24 (1).

Aranzazu H., Valencia J. A., Arcila M .I., Castrillon, C., Bolaños M. M., Castellanos. P., Perez, J. C., Rodriguez, J. L. (2002). "El Cultivo de Plátano". Manual Técnico. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria*. Regional 9:144.

Arvanitoyannis, I.S., & van Houwelingen-Koukaliaroglou, M. (2005). "Functional foods: A survey of health claims, pros and cons, and current legislation". *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 45:385–404.

Atkins, P. W. "Fisicoquímica". Editado por Addison – Wesley Iberoamericana, p. 892 – 919.

Barbosa – Cánovas, G. V. y Vega – Mercado, H. (2000). "Dehydration of foods". Aspen Publishers, Inc. USA.

Barreiro, J.; Fernández, S.; Sandoval, A. (2003). "Water sorption characteristics of six row barley malt (*Hordeum vulgare*)". Universidad Simón Bolívar. Departamento de tecnología de procesos biológicos y bioquímicos. *Rev.Lebensm-wiss.- U.-Technol.* 36:37-42.

Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., Sánchez-Hernández, L., Paredes-López, O. (1999). "Isolation and partial characterization of banana starches". *J. Agric. Food Chem.* 47:854-857.

Bone, D. P. (1987). "Practical applications of water activity and moisture relations in foods". Editorial L. B. New York, USA.

Brunauer, S.; Emmett, P.H. and Teller, E.: (1938). "Adsorption of gases in multi molecular layers". *J. Am. Chem. Soc.*, 60: 309.

Chaves, M.; Sgroppo, S.; Avanza, J. (2004). "Isotermas de adsorción de berenjenas deshidratadas". Universidad Nacional del Nordeste. Laboratorio de Tecnología Química. Argentina.

Cheesman, E. E. (1948). "Classification of the Bananas. III. Critical Notes on Species. c. *Musa paradisiaca* L. and *Musa sapientum* L.". *Kew Bulletin* 2 (3): 145–153.

Chug, D. y Pfost, H. (1967) "Adsorption y desorption of water vapour by cereal grain and their products". Part II. Development of the general isotherm equation. *Trans. ASAE*. 10(3):552-555.

Comaposada, J.; Gou, P.; Arnau, J. (2000). "The effect of sodium chloride content and temperature on pork meat isotherms". *Meat Science*, 55 (3): 291-295.

Confoco, (2006). "Polvo de Plátano". Disponible web site: www.confoco.com/confoco/productos.htm#polvoplatano. Consultada: 15 de marzo de 2009.

Consejo Nacional de Producción. (1997). "Plátano" Dirección de Mercadeo y Agroindustria. Ecuador. Boletín (C.R.) 3 (1): 1- 4. Consomer (2006). "El plátano". Disponible web site: Accesada: 08 de febrero de 2009. http://www.consumer.es/web/es/alimentacion/aprender_a_comer_bien/guia_alimentos/frutas_y_derivados/2006/01/26/148649.php

Corzo, O. & Fuentes, A. (2004). "Moisture Sorption isotherms and modeling for pre-cooked flours of Pigeon pea (*Cajanus cajans* L millsp) and lima bean (*Canavalia ensiformis*)". *Journal of food Engineering*. 65 (3): 443 - 448.

Coultate, T. P. (1984). "Alimentos, Química y sus Componentes". Editorial Acribia. Zaragoza.

COVENIN (1979). Norma Venezolana de Alimentos. "Alimentos para animales. Determinación de Cenizas", Método N° 1115-79. Comisión Venezolana de Normas industriales. Caracas – Venezuela.

COVENIN (1980). Norma Venezolana de Alimentos. "Determinación de nitrógeno", Método Kjeldahl N° 1115-80. Comisión Venezolana de Normas industriales. Caracas – Venezuela.

COVENIN (1979). Norma Venezolana de Alimentos. "Determinación de fibra cruda", Método N° 1194-79. Comisión Venezolana de Normas industriales. Caracas – Venezuela.

Crockford, M. D., Samuel, B. Knight. "Fundamentos de fisicoquímica". Editado por Compañía Editorial Continental, S. A., segunda edición. México, p. 385 - 394.

Dongowski, G., Jacobash, G. & Schmiedl, D. (2005). "Structural stability and prebiotic properties of resistant starch type 3 increase bile acid turnover and lower secondary bile acid formation". *J. Agric. Food Chem.* 53 (9): 257-267.

Echeverri, L. M.; Garcia, R. F. (1997). "Influencia de la clase de material de siembra sobre la Producción de plátano". Guatemala, *CENICAFE Avances Técnicos*, 73: 8.

Englyst, H.N. & Cummings, J.H. (1986). "Digestion of the carbohydrates of banana (*Musa paradisiaca sapientum*) in the human small intestine". *Am J Clin Nutr.* 44:42-50.

Erba, M.; Ertugay, M. F.; Certel, M. (2005). "Moisture adsorption behaviour of semolina and farina". *Journal of Food Engineering*, 69 (2): 191 - 198.

Estudio de mercado del plátano. (2005). "Resumen ejecutivo para América Latina". Ecuador.

Faisant, N., Gallant, D.J. Bouchet, B., Champ, M. (1995). "Banana starch breakdown in the human small intestine studied by electron microscopy". *Eur. J. Clin. Nutr.* 49: 98-104.

Falabella, M. C.; Aguerre, R. J.; Suárez, C. (1992). "Modelling non – isothermal sorption equilibrium data of cereal grains". *Lebensmittel – Wissenschaft und Technologi*, 25 (3): 286 – 288.

FAO/OMS. (2002). "Normas Alimentarias". Programa de Conjunto. *Comisión del Codex* (Ley o código de alimentos).

Fernández, H. (1980). "El Banano en Ecuador". Cultivo, plagas y enfermedades.

Ferro-Fontán C., Chirife J., Sancho, E. e Iglesias, H.A. (1982). "Analysis of a model for water sorption phenomena in foods". *J.F.Science*, 47 (4): 1590.

García, S.; Schmalko, M.; Tanzariello, A. (2007). "Isotermas de adsorción y sinética de secado de ciertas hortalizas y aromáticas cultivadas en misiones". INTA, argentina. *Rev. RIA*, 36 (1): 115 – 129.

Guggenheim, H., De Boer, J. H. y Anderson, R. (1984). "Description of water activity of food for engineering purposes by mean of the G.A.B. model of sorption". In Van Der Berg, C. 1980. *Engineering and foods. Elsevier Applied Science*. London. 1:311-314.

Hernández, Y., Portillo, F., Portillo, M., Navarro, C., Rodríguez, M. y Velazco, J. (2006). "Densidad estomática en materiales de plátano (*Musa* AAB, AAAB y ABB) susceptibles y resistentes a Sigatoka Negra (*Mycosphaerella fijiensis*, Morelet)". Universidad Nacional Experimental Sur del Lago "Jesús María Semprum" (UNESUR). *Rev. Fac. Agron*, 23 (3) Caracas jul. 2006.

Jovanovich G, Puppo M.C., Giner S.A., Añón M.C. (2003). "Water uptake by dehydrated soy protein isolates. Comparison of equilibrium vapour sorption and water imbibing methods", *J. Food Engineering*, 56: 331-338.

Kiranoudis, C. T.; Maroulis, Z. B.; Tsami, E.; Marinos-Kouris, D. (1993). "Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables". *Journal of Food engineering*, 20 (1): 55 - 74.

Landaeta, J. (2005). "Características de humedad de la harina precocida de batata (*Tpomea batata spp*)". Trabajo de grado de maestría, U.N.E.L.L.E.Z., Venezuela.

Lehman, U., Jacobash, G. & Schmiedl, D. (2002). "Characterization of resistant starch type III from banana (*Musa acuminata*)". *J. Agric. Food Chem.* 50:5236-5240.

Leung, H. K. (1986). "Water activity and other colligative properties of foods. In physical and chemical properties of foods". Editado por M. R. Okos. *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, M. I.

Levine, I. N. (1995). "Fisicoquímica", 4a Ed.; New Cork: McGraw – Hill.

Madrigal, A.; Guzmán, A.; Bautista, J.; García, D.; Vázquez, G.; Rodríguez, M.; Moreno, R. (2006). "Producción y caracterización fisicoquímica de harinas de bananos FHIA-17, FHIA-23 y FHIA 20 para su incorporación en panificación.

Martínez, N.; Andrés, A.; Chiralt, A.; Fito, P. (1998). "Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno". *Servicio de Publicaciones, Universidad Politécnica de Valencia*. Ref.: 98.4034.

Mclaughlin, C. P.; Magee, T. R. A. (1998). "The Determination of Sorption Isotherm and the Isosteric Heats of Sorption for Potatoes". *Journal of Food Engineering*, 35 (3): 267-280.

Montes, E.; Torres, R.; Andrade, R.; Pérez, O.; Marimon, J.; Meza, I. (2008). "Modelado de las isothermas de adsorción del ñame (*Dioscorea rotundata*)". Medellín, Colombia. *Rev. Dyna*, 76 (157): 145 – 152.

Pacheco-Delahaye, E. & Testa, G. (2005). "Evaluación nutricional, física y sensorial de panes de trigo y plátano verde". *Interciencia*, 30: 300 - 304.

Peláez, P.; Ferrer, R. (2006). "Evaluación de los modelos B.E.T. y G.A.B. de isothermas de sorción en harinas de plátano y yuca". Universidad Agraria de la Selva.

Primo, E. (1998). "Química de los Alimentos", 1^o Ed., Editorial Síntesis S.A. Madrid - España.

Ratti, C.; Crapiste, G.; Rostein, E. (1989). "A new water activity sorption equilibrium expression for solid foods based on thermodynamic considerations". *J. Food Sci.* 54(3): 738-747.

Rizvi, S. S. H. (1995). "Thermodynamics properties of food in dehydration". In M. A. Rao & S. S. H. Rizvi (Eds); *Engineering Properties of Foods*. New York: Marcel Dekker Inc, Cap. 3, p. 223-309.

Ryall, Lipton H., (1982). "Transportation & storage of fruits & vetables". Segunda edición Vol. I., p. 18-30.

Rosas, O. A. (2004). "Caracterización química del plátano FHIA-23 en dos etapas de maduración". Tesis Licenciatura. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Colima, Coquimatlán, Colima.

Sanchez, J. (2003). "Musas y Strelizias". Entrevista sobre cultivares de plátanos y bananos. España.

Sandoval, A.; Barreiro, J.; Tovar, X.; Angueira, M. (2002). "Características de sorción del cacao fermentado en polvo. (*Theobroma cacao*)". Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. *Rev. Téc. Ing.*, 25 (1).

Seetharaman, J. et al. (1997). "Synthesis, analysis and field activity of sordidin, a male-produced aggregation pheromone of the banana weevil (*Cosmopolites sordidus*)". *Journal of Chemical Ecology*. 23 (4): 1145 -1161.

Shepard, K.; Simmonds, N. (1956). "The taxonomy and origin of cultivated bananas". *J. Linn. Soc. Lond. Bot.* 55:302.

Simmonds, N. W. (1973). "Los Plátanos". Editorial Blume, primera edición. Barcelona España, p. 269 - 289, 427 - 444, 451 - 467, 539.

Singh, C; Heidman, H. (1998). "The sorption of water vapor by high polymers". *J. Am. Chem. Soc.*, 69: 646.

Soekarto, S. T.; Steinberg, M. P. (1981). "Determination of binding energy for the three fractions of bound water. In. Water Activity: Influences on Food Quality, (L. B. Rockland and G. F. Stewart, ed)", *Academic Press*, New York, p. 265-279.

Tolaba M. P.; Peltzer M.; Enriquez N.; Polio M. L., (2004). "Grain sorption equilibria of quinoa grains, *J. Food Engineering*, 61: 365 -371.

Torrealba, M. (2006). "Determinación de isothermas de sorción de humedad en harina precocida de plátano verde (*Musa paradisiaca* L.)". Trabajo de grado de maestría, U.N.E.L.L.E.Z., Venezuela.

Tsami, E.; Maroulis, Z. B.; Morunos-Kouris, D.; Saravacos, G. D. (1990). "Water sorption isotherm of raisins, currants, figs, prunes and apricots". *Journal Food Science*, 55 (6): 1594 - 1597.

Van Der Berg, C. y Bruin, S. (1981). "Water activity and its stimation in food system theoretical aspects. In water activity: influences on foods quality",. L. B. Rockland and G. F. Stewart (De) *Academia Press*. New York, N. Y., p. 15 - 45.

Vega, A.; Andrés, A.; Fito, P. (2005). "Modelado de la cinética de secado del pimentón rojo (*Capsicum aunuum* L. cu Lamayo)". Universidad de la Serena (Chile) y Universidad politécnica de Valencia (España). *Información Tecnológica*, 16 (6): 3 – 11.

Vega, A.; Lara, E.; Lemus, R. (2006). "Isotermas de adsorción en harina de maíz (*Zea mays* L.). Campinas, Chile. *Rev. Cienc. Technol. Aliment.*, 26 (4)

Wikipedia, (2009). "Enciclopedia libre Wikipedia, Categoría: Musaceae". Disponible web site: http://es.wikipedia.org/wiki/Musa_balbisiana. Consultada: 15 de marzo de 2009.

Wolf, W.; Spiess, W. E. L.; Jung, G.; Weisser, H.; Bizot, H.; Duckworth, R. B. (1984). "The water-vapour sorption isotherms of microcrystalline cellulose and purified potato starch. Results of collaborative study". *Journal of Food Engineering*, 3 (1): 51-73.

Zhang, X.; Xie Liu, De-Xiang Gu, Wei Zhou, Ren-Li Wang, Pen Liu. (1996).
“Desorption Isotherms of Some Vegetables”. *Journal Science Food
Agriculture*, 70 (3): 303-306.

ANEXO 1

**DATOS EXPERIMENTALES DE ACTIVIDAD
DE AGUA Y HUMEDAD DE HARINA
PRECOCIDA DE TOPOCHO VERDE (ABB)
“PELIPITA”, A LAS TEMPERATURAS DE
25, 30, 35 Y 40 °C.**

Cuadro 13. Datos experimentales de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a la temperatura de 25°C.

MUESTRA		PESO INICIAL (± 0,001 g)	PESO FINAL (± 0,001 g)	DIFERENCIAL DE PESOS (± 0,001 g)	Aw	TEMPERATURA EN AQUALAB (°C)
Acetato de Potasio	1.1	2,000	2,000	0,000	0,287	34,20
	1.2	2,000	2,000	0,000	0,293	34,80
	1.3	2,000	2,000	0,000	0,280	34,50
Cloruro de Magnesio	2.1	2,000	2,000	0,000	0,355	34,60
	2.2	2,000	2,000	0,000	0,350	34,50
	2.3	2,000	2,100	0,100	0,374	34,70
Bromuro de Sodio	3.1	2,000	2,000	0,000	0,590	34,40
	3.2	2,000	2,100	0,100	0,588	34,40
	3.3	2,000	2,100	0,100	0,570	34,70
Carbonato de Potasio	4.1	2,000	2,000	0,000	0,463	34,30
	4.2	2,000	2,000	0,000	0,445	34,70
	4.3	2,000	2,000	0,000	0,439	34,40
Nitrito de Sodio	5.1	2,000	2,200	0,200	0,654	34,30
	5.2	2,000	2,200	0,200	0,646	34,70
	5.3	2,000	2,000	0,000	0,640	34,80
Cloruro de Sodio	6.1	2,000	2,200	0,200	0,756	34,70
	6.2	2,000	2,100	0,100	0,744	34,60
	6.3	2,000	2,300	0,300	0,736	34,70
Cloruro de Potasio	7.1	2,000	2,400	0,400	0,838	34,40
	7.2	2,000	2,500	0,500	0,832	34,50
	7.3	2,000	2,500	0,500	0,841	34,70

Cuadro 14. Datos experimentales de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a la temperatura de 30°C.

MUESTRA		PESO INICIAL (± 0,001 g)	PESO FINAL (± 0,001 g)	DIFERENCIAL DE PESOS (± 0,001 g)	Aw	TEMPERATURA EN AQUALAB (°C)
Acetato de Potasio	1.1	2,000	3,500	1,500	0,282	34,40
	1.2	2,000	3,400	1,400	0,284	34,30
	1.3	2,000	3,500	1,500	0,277	34,40
Cloruro de Magnesio	2.1	2,000	3,500	1,500	0,370	34,60
	2.2	2,000	3,600	1,600	0,378	34,50
	2.3	2,000	3,600	1,600	0,371	34,30
Bromuro de Sodio	3.1	2,000	3,600	1,600	0,566	34,30
	3.2	2,000	3,500	1,500	0,557	34,50
	3.3	2,000	3,700	1,700	0,572	34,60
Carbonato de Potasio	4.1	2,000	3,600	1,600	0,443	34,50
	4.2	2,000	3,600	1,600	0,438	34,60
	4.3	2,000	3,500	1,500	0,440	34,40
Nitrito de Sodio	5.1	2,000	3,600	1,600	0,620	34,30
	5.2	2,000	3,600	1,600	0,624	34,30
	5.3	2,000	3,600	1,600	0,628	34,60
Cloruro de Sodio	6.1	2,000	3,600	1,600	0,740	34,20
	6.2	2,000	3,700	1,700	0,737	34,40
	6.3	2,000	3,700	1,700	0,732	34,30
Cloruro de Potasio	7.1	2,000	3,800	1,800	0,824	34,50
	7.2	2,000	3,800	1,800	0,829	34,70
	7.3	2,000	3,800	1,800	0,826	34,60

Cuadro 15. Datos experimentales de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a la temperatura de 35°C.

MUESTRA		PESO INICIAL (± 0,001 g)	PESO FINAL (± 0,001 g)	DIFERENCIAL DE PESOS (± 0,001 g)	Aw	TEMPERATURA EN AQUALAB (°C)
Acetato de Potasio	1.1	2,000	3,600	1,600	0,284	34,40
	1.2	2,000	3,600	1,600	0,253	34,60
	1.3	2,000	3,600	1,600	0,268	34,50
Cloruro de Magnesio	2.1	2,000	3,600	1,600	0,392	34,70
	2.2	2,000	3,600	1,600	0,346	34,80
	2.3	2,000	3,500	1,500	0,347	34,80
Bromuro de Sodio	3.1	2,000	3,600	1,600	0,530	34,20
	3.2	2,000	3,500	1,500	0,534	34,10
	3.3	2,000	3,600	1,600	0,527	34,60
Carbonato de Potasio	4.1	2,000	3,600	1,600	0,414	34,70
	4.2	2,000	3,600	1,600	0,416	34,60
	4.3	2,000	3,600	1,600	0,418	34,70
Nitrito de Sodio	5.1	2,000	3,700	1,700	0,630	34,60
	5.2	2,000	3,600	1,600	0,627	34,50
	5.3	2,000	3,600	1,600	0,632	34,40
Cloruro de Sodio	6.1	2,000	3,800	1,800	0,739	34,50
	6.2	2,000	3,700	1,700	0,743	34,20
	6.3	2,000	3,800	1,800	0,741	34,40
Cloruro de Potasio	7.1	2,000	3,800	1,800	0,847	34,40
	7.2	2,000	3,900	1,900	0,843	34,30
	7.3	2,000	3,900	1,900	0,852	34,20

Cuadro 16. Datos experimentales de sorción de humedad de la harina precocida de topocho verde (ABB) “Pelipita” a la temperatura de 40°C.

MUESTRA		PESO INICIAL (± 0,001 g)	PESO FINAL (± 0,001 g)	DIFERENCIAL DE PESOS (± 0,001 g)	Aw	TEMPERATURA EN AQUALAB (°C)
Acetato de Potasio	1.1	2,000	3,600	1,600	0,289	34,80
	1.2	2,000	3,600	1,600	0,244	34,60
	1.3	2,000	3,600	1,600	0,259	34,60
Cloruro de Magnesio	2.1	2,000	3,600	1,600	0,375	34,80
	2.2	2,000	3,500	1,500	0,379	34,90
	2.3	2,000	3,600	1,600	0,370	34,90
Bromuro de Sodio	3.1	2,000	3,700	1,700	0,524	34,90
	3.2	2,000	3,600	1,600	0,552	35,00
	3.3	2,000	3,600	1,600	0,531	34,90
Carbonato de Potasio	4.1	2,000	3,600	1,600	0,419	35,00
	4.2	2,000	3,600	1,600	0,438	35,00
	4.3	2,000	3,500	1,500	0,420	35,00
Nitrito de Sodio	5.1	2,000	3,700	1,700	0,618	34,30
	5.2	2,000	3,600	1,600	0,622	34,30
	5.3	2,000	3,600	1,600	0,620	34,40
Cloruro de Sodio	6.1	2,000	3,700	1,700	0,749	34,90
	6.2	2,000	3,700	1,700	0,746	34,60
	6.3	2,000	3,700	1,700	0,747	34,90
Cloruro de Potasio	7.1	2,000	3,800	1,800	0,819	34,80
	7.2	2,000	3,700	1,700	0,807	34,50
	7.3	2,000	3,700	1,700	0,821	34,40

