

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE
MADRE DE DIOS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



**“DETERMINACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE LA
HARINA DE PLATANO VERDE (*Musa paradisiaca L.*) EN PUERTO
MALDONADO – MADRE DE DIOS”.**

TESIS

Presentado por el Bachiller:

JORGE GUTIERREZ BALAREZO

Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

PUERTO MALDONADO – PERÚ

2014

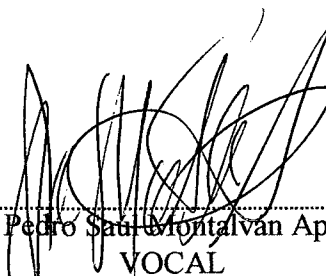
Esta tesis ha sido sustentada y aceptada en la forma presente por el Jurado Calificador de grado, nominado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, como requisito para optar el título de Ingeniero Agroindustrial.



Ing. Raúl Huamán Cruz
PRESIDENTE

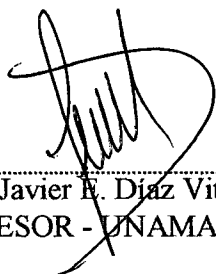


Ing. Julián Colquehuanca Vilca
SECRETARIO

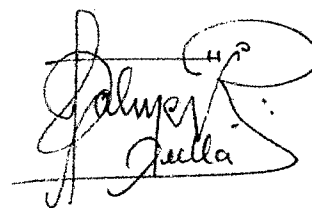


Ing. Pedro Saúl Montalván Apolaya
VOCAL

ASESORES



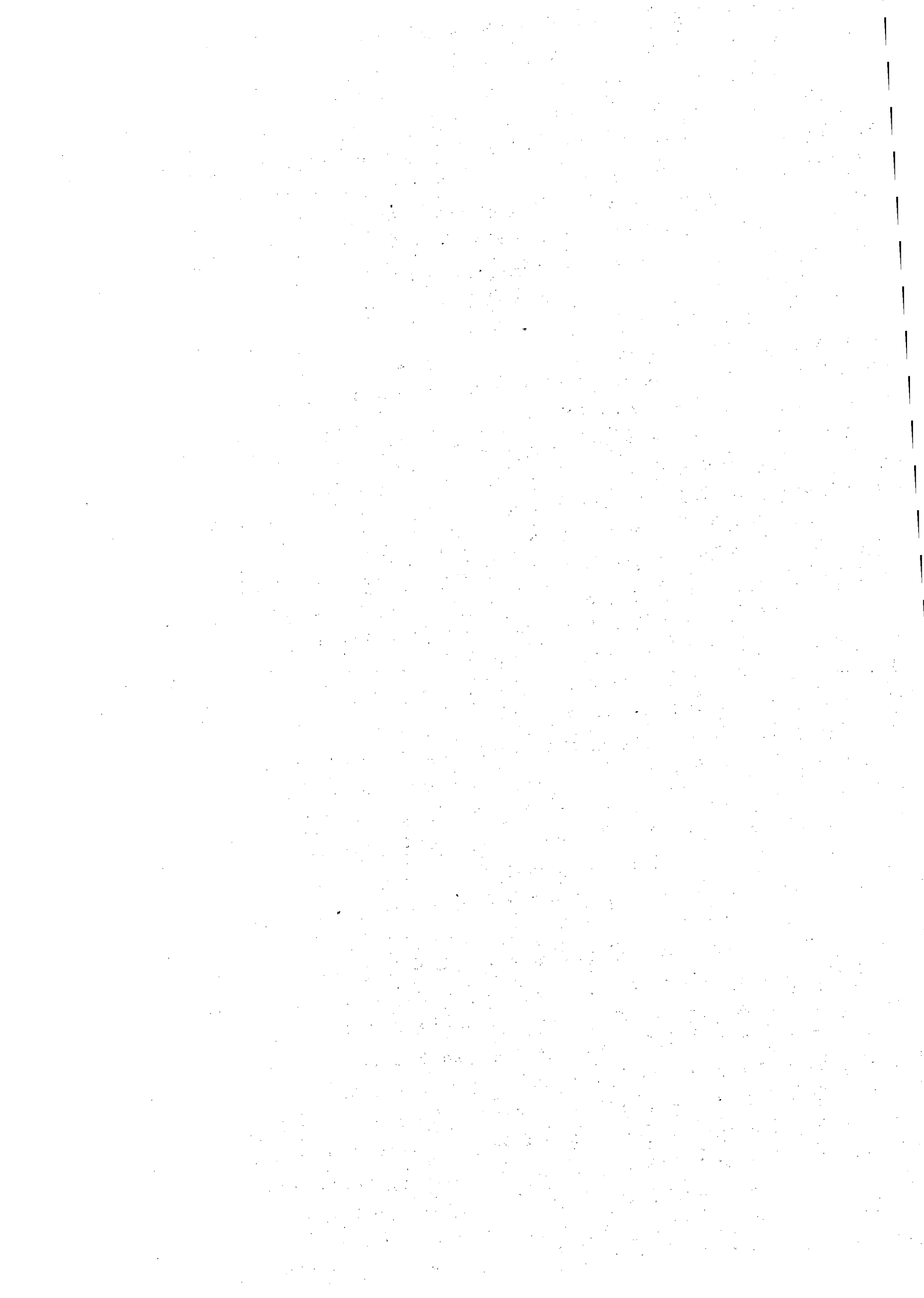
Ing. Javier E. Díaz Viteri
ASESOR - UNAMAD



Ing. Palmer V. Pulla Huilca
COASESOR



Dr. Oscar Wilfredo Mendieta Taboada
COASESOR



**ACTA DE SUSTENTACIÓN PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

En la ciudad de Puerto Maldonado, siendo las 19 horas con 15 del día 21 de junio del año 2013, en las instalaciones del anfiteatro N° 01 de la ciudad Universitaria de la UNAMAD, dando cumplimiento a la Resolución de Decanatura N° 127-2013-UNAMAD-DFI, se reunieron los miembros del Jurado integrado por los siguientes docentes:

Ing. Raúl Huamán Cruz (Presidente)

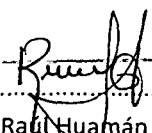
Ing. Julián Colquehuanca Vilca (Secretario)

Ing. Pedro Saúl Montalván Apolaya (Vocal)

Con la finalidad de evaluar el Trabajo de Investigación titulado: “**DETERMINACION DE LOS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE LA HARINA DE PLATANO VERDE (Musa paradisiaca L) EN PUERTO MALDONADO–MADRE DE DIOS**” presentado por el Bachiller **Jorge Gutiérrez Balarezo**. Seguido de la exposición de trabajo por parte del sustentante el jurado procede al cuestionamiento del trabajo y el sustento por parte del responsable del trabajo de Investigación. Acto seguido, el jurado procede a la deliberación en base a una discusión en forma reservada y libremente, declarando el trabajo expuesto como APROBADO por UNANIMIDAD, con el calificativo de Muy Buena y la nota de 17.

En fe de la cual firmamos la presente acta, siendo las 20 horas con 30 minutos del día 21 de Junio del 2013, se dio por culminado el presente acto de sustentación.

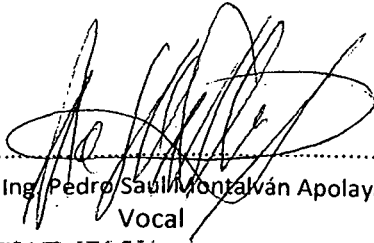
El sustentante deberá levantar todas las observaciones realizadas por los miembros del Jurado calificador.



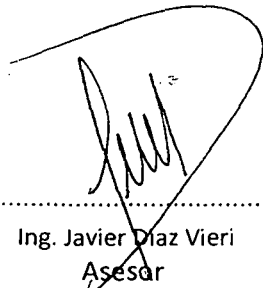
Ing. Raúl Huamán Cruz
Presidente



Ing. Julián Colquehuanca Vilca
Secretario



Ing. Pedro Saúl Montalván Apolaya
Vocal



Ing. Javier Díaz Vieri
Asesor

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A Mi madre Miria Balarezo, por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y porque siempre me apoyaste. Mamá gracias por enseñarme a valorar las cosas más simples de la vida y gracias por su infinito amor.

Y a mi esposa Karina Salas, por su apoyo día a día para y perseverancia que la caracteriza lo cual me ayuda a ser una mejor persona.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi Sentimiento de Gracitud:

A la **Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios**, Facultad de Ingeniería, por la formación académica profesional durante los años de estudio en dicha institución.

Al **Ing. Palmer Vicente Pulla Huillca**, por su asesoramiento permanente, consejos, por su amistad y por su apoyo brindado para la elaboración del presente trabajo.

Al **Ing. Javier E. Díaz Viteri** por su asesoramiento permanente, consejos, por su amistad y por su apoyo brindado para la elaboración del presente trabajo.

A mis seres queridos que siempre se encuentran a mi lado con su constante apoyo moral para continuar con este trabajo de investigación.

Jorge Gutierrez Balarezo

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
GLOSARIO	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEORICO	4
2.1. ANTECEDENTES	4
2.2. Generalidades del Plátano (<i>Musa paradisiaca</i> L.).....	5
2.2.1. Taxonomía del Plátano	6
2.2.2. Morfología del Plátano	7
2.2.3. Valor Nutricional	10
2.2.4. Usos del Plátano	11
2.3. EL AGUA EN LOS ALIMENTOS	13
2.4. ACTIVIDAD DEL AGUA (a_w).	14
2.5. ISOTERMAS DE SORCIÓN	17
2.5.1. Zonas en la Isoterma de Sorción	18
2.5.2. Clasificación de las Isotermas de Sorción	19
2.5.3. Adsorción	20
2.5.3.1. Factores en la Adsorción	21
2.5.4. Interés de las Isotermas de Sorción para la Tecnología Alimentaria	25
2.5.5. Modelos Matemáticos de Isotermas de Sorción en Función de la Temperatura, Humedad y Actividad de Agua	26
2.5.5.1. Modelo de BET (Brunauer, Emmet y Teller)	27
2.5.5.2. Modelo de GAB (Guggenheim, Anderson y De Boer)	28
2.5.5.3. Modelo de Halsey	29
2.5.5.4. Modelo de Oswin	29
2.5.5.5. Modelo de Chung – Pfof	30
2.5.6. Calidad de Ajuste de los modelos matemáticos	31
2.5.7. Métodos de medición de isotermas de sorción	31
2.6. Calor Isostérico de Sorción	33
III. MATERIALES Y MÉTODOS	36
3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN	36
3.2. MATERIALES	36
3.2.1. Materia Prima	36
3.2.2. Reactivos (Sales)	36
3.2.3. Equipos de Laboratorio	37
3.2.4. Materiales	37
3.2.5. Soluciones Químicas de Desinfección	37
3.3. METODOLOGÍA	38
3.3.1. Caracterización de la Materia Prima	38
3.3.2. Acondicionamiento de la Muestra	38
3.3.3. Determinación de la Isoterma de Adsorción	40

3.3.4. Determinación de la Humedad de Equilibrio (X_e)	43
3.3.5. Ajuste Matemático de las Isotermas de Adsorción	43
3.3.6. Determinación de la Monocapa del Modelo de GAB	44
3.3.7. Determinación del Calor Isostérico de Adsorción (Q_{st})	44
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	46
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA HARINA DE PLÁTANO (<i>Musa paradisiaca</i> L.)	46
4.2. HUMEDAD DE EQUILIBRIO	46
4.3. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN	48
4.4. MODELADO MATEMATICO DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCION PARA HARINA DE PLATANO (<i>Musa paradisiaca</i> L.)	49
4.5. CALOR ISOSTÉRICO DE ADSORCIÓN	55
V. CONCLUSIONES	61
VI. RECOMENDACIONES	63
VII. BIBLIOGRAFÍA	64
VIII. ANEXOS	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01: Composición proximal de la harina de plátano verde (en 100 g)	11
Tabla 02: Métodos para la determinación de la isoterma de sorción	32
Tabla 03: Tipos de análisis fisicoquímicos realizados en la harina de plátano y sus respectivas normas de determinación	38
Tabla 04: Sales y ecuaciones utilizadas para obtener la a_w a una temperatura (K) determinada	41
Tabla 05: Variación de las humedades relativas de equilibrio (%) de las sales en función de las tres temperaturas experimentadas	41
Tabla 06: Cantidad de agua y sal recomendados para la preparación de soluciones salinas saturadas	42
Tabla 07: Composición proximal de la muestra de harina de plátano (<i>Musa paradisiaca L.</i>)	46
Tabla 08: Valores de humedad de equilibrio, X_e (g agua/g m.s.) experimental de las muestras secas de ají en función de la actividad de agua (a_w) a las temperaturas de estudio	47
Tabla 09: Parámetros de ajuste de las isoterma de adsorción de harina de plátano (<i>Musa paradisiaca L.</i>) para los diferentes modelos matemáticos con sus respectivos coeficientes de determinación (R^2), el Porcentaje de error medio relativo (%E), a las tres temperaturas (35°C, 45°C, 55°C).....	50
Tabla 10: Calor isostérico de adsorción (q_{st}) de la harina de plátano verde a diferentes valores de humedad de equilibrio.....	56
Tabla 11: Parámetros q_0 y X_0 y el coeficiente de correlación (R^2) ajustados de la ecuación de Tsami <i>et al.</i> (1990).....	60
Tabla 12: Valores experimentales y calculados de la humedad de equilibrio (X_e) de la harina de plátano (<i>Musa paradisiaca L.</i>) verde, obtenidos mediante los modelos evaluados a 35°C, 45°C y 55°C.....	72
Tabla 13: Valores experimentales del cambio de peso de la muestra hasta alcanzar el equilibrio a las temperaturas de 35°C.	73

Tabla 14: Valores experimentales del cambio de peso de la muestra hasta alcanzar el equilibrio a las temperaturas de 35°C.	73
Tabla 15: Valores experimentales del cambio de peso de la muestra hasta alcanzar el equilibrio a las temperaturas de 35°C.	74

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01: Planta de plátano (<i>Musa paradisiaca</i>) y sus partes	8
Figura 02: Cambios que Ocurren en Alimentos en Función del Contenido de agua .	16
Figura 03: Isotherma de Sorción de Humedad de Equilibrio Generalizada para el Rango de Baja Humedad de un Alimento (20°C)	17
Figura 04: Los cinco tipos de Isothermas	20
Figura 05: Curvas de logaritmo natural de la actividad de agua, para específicos valores de contenido de agua de equilibrio, en función de valores de $1/T$ (K^{-1})	35
Figura 06: Diagrama de operaciones para la obtención de la Harina de Plátano Verde (<i>Musa paradisiaca L.</i>)	39
Figura 07: Diagrama de flujo para la determinación de las isothermas de adsorción de la harina de plátano verde	45
Figura 08: Isothermas de adsorción experimental de harina de plátano a temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C	48
Figura 09: Isotherma de adsorción experimental de harina de plátano ajustadas al modelo de GAB a temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C	51
Figura 10: Isothermas de adsorción experimental de harina de plátano ajustadas al modelo Halsey a temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C	52
Figura 11: Isothermas de adsorción experimental de harina de plátano ajustadas al modelo Oswin a temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C	52
Figura 12: Isothermas de adsorción experimental de harina de plátano ajustadas al modelo BET a temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C	53
Figura 13: Isothermas de adsorción experimental de harina de plátano ajustadas al modelo Chung-Pfost a temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C	53
Figura 14: Curvas de $\ln(a_w)$ versus $1/T$ a diferentes humedades de equilibrio para la harina de plátano verde.....	57

Figura 15:	Influencia de la humedad de equilibrio (X_e) en el calor de adsorción (q_{st}) para la harina de plátano verde.....	58
Figura 16:	Influencia de la humedad de equilibrio (X_e) en el calor de adsorción (q_{st}) para la harina de plátano verde, según la ecuación de Tsami et al. (1990)...	59
Figura 17:	Plátano (<i>Musa paradisiaca L.</i>) verde.....	75
Figura 18:	Plátano (<i>Musa paradisiaca L.</i>) verde embaladas para transportar.....	75
Figura 19:	Hojuelas de Plátano (<i>Musa paradisiaca L.</i>) verde.....	75
Figura 20:	Harina de Plátano (<i>Musa paradisiaca L.</i>) verde.....	75
Figura 21:	Pesado de las muestras durante el secado.....	76
Figura 22:	Muestra de harina de Plátano (<i>Musa paradisiaca L.</i>) verde.....	76
Figura 23:	Pesado Inicial de las muestras de harina de plátano (<i>Musa paradisiaca L.</i>)	76
Figura 24:	Campana desecadora conteniendo las muestras de harina de plátano ya pesadas.....	76

GLOSARIO

- a_w = Actividad de agua.
- f = Fugacidad de la solución.
- f_0 = Fugacidad del solvente puro.
- P = Presión parcial de vapor de agua en el sistema (alimento).
- P_0 = Presión de saturación del agua líquida pura a la misma temperatura.
- HRE = Humedad relativa de equilibrio.
- X_e = Humedad de equilibrio (g agua/g m.s.).
- X_m = Humedad de la monocapa (g agua/g m.s.).
- C_{BET} = Constante de BET relacionada al calor de sorción.
- C_{GAB} = Constante de Guggenheim, característica del producto y relacionada con el calor de absorción de la monocapa.
- K_{GAB} = Es un factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.
- A y B = Constantes características de las ecuaciones 5, 6 y 7 que dependen de la temperatura.
- R = Constante universal de los gases, $8.314 \text{ KJ}^{-1} \text{ K}^{-1}$.
- T = Temperatura absoluta ($^{\circ}\text{K}$).
- %E = Porcentaje de error medio relativo.
- n** = Número de observaciones.
- Q_{st} = Calor isostérico total de sorción (KJ/mol).
- q_{st} = Calor isostérico neto de sorción (KJ/mol).
- λ = Calor de vaporización del agua pura (KJ/mol).
- q_0 = Calor isostérico de sorción de la primera molécula de agua (KJ/mol).
- X_0 = Contenido de humedad inicial del material alimenticio (g agua/g m.s.).
- R^2 = Coeficiente de determinación.
- m_{eq} = Masa de la muestra en el equilibrio (g).
- m_s = Masa de la muestra seca (g).
- b.s. = Base seca.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar las isotermas de absorción de humedad de harina de plátano verde a tres temperaturas (35, 45 y 55 °C) para el rango de a_w entre 0,0979 y 0,8210. Las isotermas se modelaron utilizando cinco ecuaciones comúnmente aplicadas en alimentos. La calidad de ajuste se evaluó 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 y Oswin ajustaron de mejor manera los datos experimentales. La humedad de la monocapa (X_m) presentó dependencia con la temperatura con un valor de 0.1351 g agua/g m.s. Se calculó el calor isostérico de adsorción (Q_s) usando la ecuación de Clausius-Clapeyron, obteniéndose un máximo de 31 kJ/mol K, para una humedad de 0,05 g agua/g m.s., este parámetro se modeló utilizando la ecuación propuesta por Tsami.

Palabras-clave: harina de plátano, isotermas de adsorción, calor isostérico.

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the moisture sorption isotherms of green banana flour at three temperatures (35, 45 and 55 ° C) for the range between 0.0979 and 0.8210 a_w . The isotherms were modeled using five equations commonly applied in food. The quality of fit was assessed with the correlation coefficient (r^2) and the relative mean error percentage (% E), based on which it was observed that the models proposed by GAB and Oswin were adjusted better to experimental data. The humidity of the monolayer (X_m) presented temperature dependence with a value of 0.1351 g water / g ms The isosteric heat of absorption (Q_s) was calculated using the Clausius-Clapeyron equation, yielding a maximum of 31 kJ/mol K, for a humidity of 0.05 g water/g m.s., this parameter was modeled using the equation given by Tsami.

Key words: banana flour, sorption isotherms, isosteric heat.

I. INTRODUCCIÓN

El plátano es uno de los alimentos de primera necesidad más importantes en las zonas tropicales y su producción para la venta en mercados locales es, junto con la producción lechera y la horticultura, una de las pocas actividades que proporciona a las unidades familiares ingresos regulares durante todo el año (Arias *et al.*, 2004), y uno de los cultivos más importante del mundo, después del arroz, el trigo y el maíz. Además de ser considerado un producto básico y de exportación, constituye una importante fuente de empleo e ingresos en numerosos países en desarrollo.

En algunas regiones se produce harina tanto de bananos como de plátanos de cocer. Esta harina se utiliza en refrescos, sopas y para hornear. El plátano también es utilizado para la producción de vinagre y la fabricación de bebidas alcohólicas. Sus flores se pueden consumir como verdura previa cocción breve en agua de sal para extraer las sustancias amargas. Además sirve para forraje con un alto contenido de almidón (p. ej.: en el engorde de cerdos). Las hojas frescas tienen un alto contenido proteínico y por su rico sabor son muy apreciadas por rumiantes y gallinas. Las hojas, además, se utilizan como material de embalaje y como cobertura de techos, y junto con sus pseudo troncos forman un excelente material para mulch (cobertura del suelo con materia orgánica muerta)⁽¹⁾.

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 (a_w), lo que permiten su conservación a temperatura ambiente en empaque adecuado y siendo además una de 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. (Madrigal *et al.*, 2006).

(1) Guías de 18 cultivos - Asociación Naturland 2a edición.

La actividad de agua (a_w) es un parámetro que indica la disponibilidad de agua en un alimento para que existan reacciones químicas, bioquímicas (por ejemplo oxidación de lípidos, reacciones enzimáticas, reacción de Maillard) y desarrollo microbiano (**Comaposada et al., 2000**), citado por (**Vega et al., 2006**). Por esto la actividad de agua es un parámetro bastante usado como indicador para predecir la vida útil de un alimento.

Además (**Zhang et al., 1996**), explica que la isoterma de un producto relaciona gráficamente, a una temperatura constante, el contenido de humedad de equilibrio de un producto 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. Pues son también importantes para predecir los cambios en la estabilidad de los alimentos y en la elección del material de empaque adecuado.

Las isotermas de sorción de humedad son características fundamentales de los productos alimenticios, esenciales para los procesos de secado y en relación con casi todos los aspectos de la estabilidad de almacenamiento, de productos secos o de productos de baja humedad. El comportamiento de las isotermas sorción es también necesario para conocer su relación con las características físicas, química y de la estabilidad de los productos deshidratados y parcialmente deshidratados. (**Hubinger et al., 2009**).

La utilidad de las ecuaciones para fijar isotermas de sorción de agua en alimentos y/o productos relacionados, radica en que proporcionan información fundamental para la óptima conservación de los alimentos por deshidratación, es decir, una isoterma puede ayudar a estimar “el tiempo de secado de un alimento, el tiempo de vida en anaquel de productos deshidratados y empacados en materiales adecuados, las condiciones de equilibrio antes de mezclar productos con varias actividades de agua” (**Viccina, 2006**). Asimismo “las isotermas (ecuaciones) son necesarias para evaluar las funciones termodinámicas del agua sorbida en alimentos”. **Matos (1992)**, citado por **Viccina, 2006**.

Por tal razón, la presente investigación se planificó para determinar las isotermas de adsorción de la harina de plátano (*Musa paradisiaca* L.) a diferentes temperaturas y actividades de agua (a_w) (Humedades relativas), con la finalidad de evaluar y encontrar sus condiciones adecuadas de almacenamiento, lo cual asegure su mayor estabilidad, ya que este producto presenta un gran potencial como alimento básico para los niños de nuestra región y puede ser usado en la industria alimenticia como en los alimentos balanceados para los desayunos escolares, repostería, gomas, etc., el cual puede ser aprovechado en gran medida, debido a que esta variedad de plátano (*Musa paradisiaca* L.) se puede encontrar una buena cantidad en nuestra región.

Los objetivos del presente trabajo fueron:

- ▶▶ Modelar matemáticamente las isotermas de adsorción sometidas a temperaturas de 35, 45 y 55°C, y actividades de agua de entre 0.0979 a 0.8210
- ▶▶ Determinar el calor isostérico de sorción modelado en función del contenido de humedad del producto.
- ▶▶ Determinar el contenido de humedad de la monocapa del producto.

- ▶▶ Determinar los parámetros de humedad relativa y temperatura óptimas para el almacenamiento de harina de plátano.

CAPITULO I

II. MARCO TEORICO

2.1. ANTECEDENTES

Torrealba, (2007), determinó las isotermas de sorción de humedad en harina precocida de plátano verde (*Musa paradisiaca L.*) evaluando el comportamiento a cuatro temperaturas diferentes (20, 25, 30 y 35 °C), en un rango de a 0,202 a 0,835. Los datos experimentales de actividad de agua y contenido de humedad, se ajustaron a las ecuaciones propuestas por Ratti *et al.* (1989); Chung y Pfof (1967); GAB (Guggenheim et al., 1984) y la ecuación BET (Brunauer et al., 1938); utilizando análisis de regresión no lineal y el coeficiente de determinación (R^2) del programa Statistic V-6. De los modelos evaluados fueron Ratti *et al.* (1989) y Chung y Pfof (1967) los que ajustaron mejor las isotermas de sorción; el primero presentó un coeficiente de determinación de 0,991 y 0,996, para todas las temperaturas analizadas y el segundo un coeficiente entre 0,9735 y 0,9876. Se determinó el valor de la monocapa con las ecuaciones de BET (Brunauer-Emmett-Teller, 1938) y GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer, 1984), con mejores resultados con el modelo de BET, cuyos valores se ubicaron entre 0,0243 y 0,0033 g de H₂O/g de sólido. Finalmente se evaluó el calor isostérico de sorción requerido por la harina precocida de plátano verde para alcanzar el equilibrio sorcional, mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron en su forma integrada (Soekarto y Steinberg, 1981), concluyéndose que este calor varía con la temperatura y el contenido de humedad.

Vega *et al.*, (2006), determinaron las isotermas de adsorción de humedad de harina de maíz a tres temperaturas (7, 22 y 45 °C) para el rango de a_w entre 0,10 y 0,95. Las isotermas se modelaron utilizando siete ecuaciones comúnmente aplicadas en alimentos. La calidad de ajuste se evaluó 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, Oswin y Halsey ajustaron de mejor manera los datos experimentales. La humedad de la monocapa (X_m) y la humedad de seguridad (X_s) presentaron dependencia con la temperatura con valores de E_a de 13,6 y 3,3 kJ/mol, respectivamente. Se calculó el calor isostérico de

adsorción (Q_s) usando la ecuación de Clausius-Clapeyron, obteniéndose un máximo de 21 kJ/mol, para una humedad de 0,075 g agua/g m.s., este parámetro se modeló utilizando la ecuación propuesta por Tsami.

2.2. GENERALIDADES DE EL PLÁTANO (*Musa paradisiaca* L.)

El plátano es la fruta tropical más cultivada y una de las cuatro más importantes en términos globales, sólo por detrás de los cítricos, la uva y la manzana. Los países latinoamericanos y del Caribe producen el grueso de los plátanos que entran en el comercio internacional, a pesar de que los principales productores son India y China, siendo el principal cultivo de las regiones húmedas y cálidas del sudoeste asiático. Los principales importadores son Europa, EE.UU., Japón y Canadá. Los consumidores del norte lo aprecian sólo como un postre, pero constituye una parte esencial de la dieta diaria para los habitantes de más de cien países tropicales y subtropicales.

El plátano es uno de los cultivos más importante del mundo, después del arroz, el trigo y el maíz. Además de ser considerado un producto básico y de exportación, constituye una importante fuente de empleo e ingresos en numerosos países en desarrollo.

El plátano tiene su origen probablemente en la región indomalaya donde han sido cultivados desde hace miles de años. Desde Indonesia se propagó hacia el sur y el oeste, alcanzando Hawaii y la Polinesia. Los comerciantes europeos llevaron noticias del árbol a Europa alrededor del siglo III a. C., aunque no fue introducido hasta el siglo X. De las plantaciones de África Occidental los colonizadores portugueses lo llevarían a Sudamérica en el siglo XVI, concretamente a Santo Domingo. (Vasquez *et al.*, 2005)

El Plátano fue sembrado en el Perú, desde 1500, primero en la costa luego en los valles interandinos de la ceja de selva y finalmente en la selva baja que representa el 70% de la superficie total del país. En Madre de Dios, su cultivo se realiza especialmente de las fajas

aluviales de los principales ríos como el Tambopata, Madre de Dios, Manu, Tahuamanu y sus afluentes. (Dirección Regional de Agricultura de Madre de Dios, 2009).

2.2.1. TAXONOMÍA DEL PLÁTANO.

El nombre de plátano, banana, banano, cambur, topocho o guineo agrupa a un gran número de plantas herbáceas del género *Musa*, tanto híbridos obtenidos horticulturalmente a partir de las especies silvestres del género *Musa acuminata* y *Musa balbisiana* como cultivares genéticamente puros de estas especies. Clasificado originalmente por Linnaeus como *Musa paradisiaca* en 1753, la especie tipo del género *Musa*, estudios posteriores han llevado a la conclusión de que la compleja taxonomía del género incluye numerosos híbridos, de variada composición genética, y se ha desarrollado un sistema estrictamente sui generis de clasificación para dar cuenta de esta variación. Sin embargo, de acuerdo a las reglas del Código Internacional de Nomenclatura Botánica, el nombre linneano cuenta con prioridad, y sigue siendo usado tanto en su forma original como en la modificada *Musa paradisiaca*, que indica que se trata de un híbrido para designar genéricamente a estas variedades. (Cheesman, 1948), quien además menciona que el plátano macho pertenece a la misma especie del plátano común, es el plátano verde o para cocer que se cultiva como si fuera una hortaliza en zonas de la selva tropical; su especie es *Musa paradisiaca* y pertenece a la familia de las Musáceos, su origen es asiático y se cultiva en todas las regiones tropicales y subtropicales de América, variedad que en esta ocasión estamos utilizando para esta investigación.

En la nomenclatura autóctona a veces se traza una diferencia entre las bananas, consumidas crudas como fruta de postre, y los plátanos, que por su superior contenido en fécula deben asarse o freírse antes de su ingesta. La diferencia no se corresponde exactamente con ningún criterio genético; aunque las variedades con mayor presencia genética de *M. balbisiana* suelen estar comprendidas en este segundo grupo, no se puede determinar si una planta producirá plátanos o bananas simplemente por su constitución genética. La confusión aumenta por el hecho de que en otras regiones los términos se consideran perfectamente sinónimos. (Cheesman, 1948).

En todo caso, este grupo de vegetales conforman la fruta intertropical más consumida del mundo. Se trata de una falsa baya, de forma falcada o elongada, que crece en racimos de hasta cien unidades y 50 kg de peso; de color amarillo cuando está maduro, es dulce y carnoso, rico en carbohidratos, potasio, vitamina A y vitamina C. Es mucho más rico en calorías que la mayoría de las frutas por su gran contenido en fécula; de los 125 g que pesa en promedio, el 25% es materia seca, que aporta unas 120 calorías. (Cheesman, 1948).

Linnaeus en 1753 y posteriormente según el Código Internacional de Nomenclatura Botánica, clasifican taxonómicamente al plátano de la siguiente manera. (Cheesman, 1948).

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Zingiberales

Familia: Musaceae

Género: *Musa*

Especie: *M. paradisiaca*

Nombre Binomial.

Musa x paradisiaca L.

2.2.2. MORFOLOGÍA DEL PLÁTANO.

El plátano es una planta herbácea perenne gigante, con rizoma corto y alto aparente, que resulta de la unión de las vainas foliares, cónico y de 3,5-7,5mt de altura, terminando en una corona de hojas. (Vasquez *et al.*, 2005).

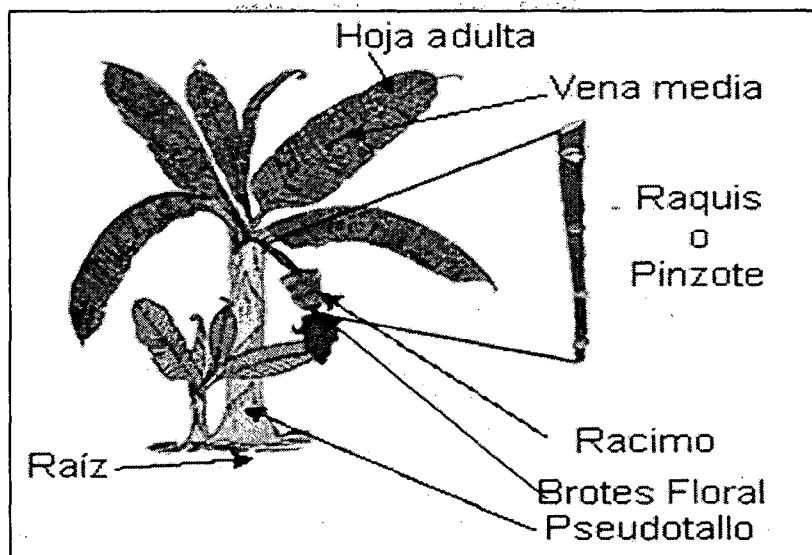


Figura 01: Planta de plátano (*Musa paradisiaca*) y sus partes

En la parte del plátano (*Musa paradisiaca*) se pueden distinguir las siguientes partes:

- a) **Rizoma o bulbo:** tallo subterráneo con numerosos puntos de crecimiento (meristemos) que dan origen a pseudotallos, raíces y yemas vegetativas. (Vazquez *et al.*, 2005)

- b) **Sistema radicular:** posee raíces superficiales que se distribuyen en una capa de 30-40 cm, concentrándose la mayor parte de ellas en los 15-20 cm. Las raíces son de color blanco, tiernas cuando emergen y amarillentas y duras posteriormente. Su diámetro oscila entre 5 y 8 mm y su longitud puede alcanzar los 2,5-3 m en crecimiento lateral y hasta 1,5 m en profundidad. El poder de penetración de las raíces es débil, por lo que la distribución radicular está relacionada con la textura y estructura del suelo. (Vazquez *et al.*, 2005).

- c) **Tallo:** el verdadero tallo es un rizoma grande, almidonoso, subterráneo, que está coronado con yemas, las cuales se desarrollan una vez que la planta ha florecido y fructificado. A medida que cada chupón del rizoma alcanza la madurez, su yema terminal se convierte en una inflorescencia al ser empujada hacia arriba desde el interior del suelo por el alargamiento del tallo, hasta que emerge arriba del pseudotallo. (Vazquez *et al.*, 2005)

- d) **Hojas:** se originan en el punto central de crecimiento o meristemo terminal, situado en la parte superior del rizoma. Al principio, se observa la formación del pecíolo y la nervadura central terminada en filamento, lo que será la vaina posteriormente. La parte de la nervadura se alarga y el borde izquierdo comienza a cubrir el derecho, creciendo en altura y formando los semilimbos. La hoja se forma en el interior del pseudotallo y emerge enrollada en forma de cigarro. Son hojas grandes, verdes y dispuestas en forma de espiral, de 2-4 m de largo y hasta 1,5 m de ancho, con un pecíolo de 1 m o más de longitud y un limbo elíptico alargado, ligeramente decurrente hacia el pecíolo, un poco ondulado y glabro. Cuando son viejas se rompen fácilmente de forma transversal por el azote del viento. De la corona de hojas sale, durante la floración, un escapo pubescente de 5-6 cm de diámetro, terminado por un racimo colgante de 1-2 m de largo. Éste lleva una veintena de brácteas ovales alargadas, agudas, de color rojo púrpura, cubiertas de un polvillo blanco harinoso. De las axilas de estas brácteas nacen a su vez las flores. (Vazquez *et al.*, 2005)
- e) **Flores:** flores amarillentas, irregulares y con seis estambres, de los cuales uno es estéril, reducido a estaminodio petaloideo. El gineceo tiene tres pistilos, con ovario ínfero. El conjunto de la inflorescencia constituye el “régimen” de la platanera. Cada grupo de flores reunidas en cada bráctea forma una reunión de frutos llamada “mano”, que contiene de 3 a 20 frutos. Un régimen no puede llevar más de 4 manos, excepto en las variedades muy fructíferas, que pueden contar con 12-14. (Vazquez *et al.*, 2005)
- f) **Fruto:** baya oblonga. Durante el desarrollo del fruto éstos se doblan geotrópicamente, según el peso de este, determinando esta reacción la forma del racimo. Los plátanos son polimórficos, pudiendo contener de 5-20 manos, cada una con 2-20 frutos, siendo su color amarillo verdoso, amarillo, amarillo-rojizo o rojo. Los plátanos comestibles son de partenocarpia vegetativa, o sea, desarrollan una masa de pulpa comestible sin ser necesaria la polinización. Los óvulos se atrofan pronto, pero pueden reconocerse en la pulpa comestible. La partenocarpia y la esterilidad son mecanismos diferentes, debido a cambios genéticos, que cuando menos son parcialmente independientes. La

mayoría de los frutos de la familia de las *Musáceas* comestibles son estériles, debido a un complejo de causas, entre otras, a genes específicos de esterilidad femenina, triploidía y cambios estructurales cromosómicos, en distintos grados. (Vazquez *et al.*, 2005).

2.2.3. VALOR NUTRICIONAL

El valor nutricional de los plátanos ha sido estudiado por diversos autores. Los plátanos son esencialmente alimentos azucarados y fáciles de digerir ya que la pequeña cantidad de almidón que la fruta madura contiene, posee de un 54 – 80% de digestibilidad y además es muy fácil de simular. El plátano es importante por su alto valor energético, su aporte es similar al maíz (300 Kcal. x 100g. de producto deshidratado o bien, una caloría x gramo de fruta fresca), además posee bajo nivel de fibra cruda, que lo hace apto para el consumo humano (Soto, 1991). Ocupa un sitio especial en las dietas bajas en colesterol y sal, además contiene sodio y hay indicio de cantidades mínimas de potasio de 400mg/100g. de pulpa. Es bajo en contenido de lípidos, a pesar de tener un alto valor energético (Stover y Simmonds, 1987), citado por (Jimenez, 2012). Esta variedad (plátano macho), contiene grandes cantidades de hidratos de carbono complejos (almidón) y es rico en minerales como potasio y magnesio, por lo que constituye una importante fuente de energía. (Soto, 1991), citado por (Jimenez, 2012). Representa un factor económico y una fuente de alimento importante para una región como la nuestra.

La composición química del plátano, dependerá del estado de madurez en el que se encuentre la fruta, en estado verde o inmaduro, el plátano presenta un 70-74% de humedad, 1% de proteína, 0.3-0.5% de lípidos, 20-30% de carbohidratos totales, 0.5% de fibra total y 1% de cenizas. Este producto alcanza aproximadamente un contenido energético de 4 Kcal/g (Tobin y Muller, 1998; Chávez *et al.*, 1992), citado por (Jimenez, 2012). También se han encontrado la presencia de una variedad de minerales y dependiendo el tipo de plátano varía la proporción de estos.

Tabla 01: Composición proximal del plátano verde (en 100 g)

COMPONENTE	VALOR
Energía (Kcal)	396
Agua (g)	75.7
Proteína (g)	0.5
Lípidos (g)	0.2
Carbohidratos (g)	11.6
Fibra (g)	1
Vitamina A (g)	38
Ácido ascórbico (mg)	4.4
Acido fólico (mg)	9.4
Potasio (mg)	196.6
Hierro (mg)	0.1

Fuente: **Pérez Lizaur *et al*, 3 Ed.**

El polisacárido predominante en el plátano verde es el almidón, que constituye la mayor fracción de los hidratos de carbono, a medida que la fruta madura, el polisacárido se hidroliza por la acción de las amilasas y mediante otros sistemas enzimáticos se sintetiza sacarosa y fructuosa que se encuentra cuando llega a la maduración, razón por la cual el plátano maduro es más dulce.

2.2.4. USOS DEL PLÁTANO

Su consumo se da en diversas formas: inguiri (plátano verde o pintón hervido), en chapo (plátano maduro o muy maduro hervido y batido en agua o en leche), en mazamorra (en base a la harina de plátano verde o plátano raspado), en tacaco (plátano verde chancado acompañado con carne de cerdo o de monte), en sopa (rallado de plátano verde, acompañado de pescado), en chifles (plátano cortado en rodajas y fritos en aceite), y en jugos (a base de plátano guineo).

Para extender los usos del plátano, se puede mencionar que este producto se puede utilizar en la producción de almidón ya que éste constituye una excelente materia prima para modificar la textura y consistencia de los alimentos (**French, 1984; Biliaderis, 1991**). La

utilización del almidón en aplicaciones industriales, se están desarrollando almidones granulares solubles en agua fría (AGSAF). Éstos confieren propiedades funcionales importantes a muchos alimentos instantáneos, tales como una mayor viscosidad, textura suave y propiedades similares a las de los almidones pre y gelatinizados (**Chen y Jane, 1994a**), citado por (**Bello – Pérez *et al*, 2002**).

El plátano tiene un rendimiento muy alto, pero su producción es muy irregular con altibajos y el mercado de Puerto Maldonado es reducido y su comercialización extra departamental es limitada por inadecuadas vías de transporte y el desconocimiento de los agricultores en la posibilidad de otros mercados, más ahora por la culminación de la Carretera Interoceánica.

En 1997 se cosecharon 1 007 ha. produciéndose 10 488 TM y en el año 1999 de 943 has. cosechadas, se obtuvo una producción de 10 206 TM, mientras que para el año 2009 se cosechó 10611 TM, en 982.50 Ha, lo que da un rendimiento de 10800 kg/ha, (**Dirección Regional de Agricultura de Madre de Dios**).

Entre las variedades más conocidas en la localidad tenemos: inguiri, bellaco, plátano enano, de seda, de la isla, perita, manzano, colorado, morado guineo, mata borracho o plátano indio, plátano zambo.

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 (aw), 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 más de 30 Ha de banano y plátano FHIA como cultivares comerciales. (Madrigal, 2007).

2.3. EL AGUA EN LOS ALIMENTOS.

Según Clemente (2003), citado por (Pulla, 2012), el agua es el componente que domina los sistemas alimentarios, influyendo significativamente en las variables del proceso, las características del producto y los factores de estabilidad. Todos los alimentos contienen agua y es bien conocido que más susceptibles de degradación (tanto física como química) son los que contienen altos niveles de agua. El agua controla la mayoría de los fenómenos físicos, químicos y microbiológicos que ocurren en los alimentos ya que constituye el medio de reacción y es el componente principal en la mayoría de ellos.

No obstante, también se ha observado que diferentes tipos de alimentos con el mismo contenido de agua difieren significativamente en su estabilidad y vida útil. En consecuencia, el contenido de agua por sí solo, no es un indicador real de la estabilidad. Esta situación se atribuye, en parte, a diferencias en la intensidad con que el agua se asocia con los constituyentes no acuosos; el agua implicada en asociaciones fuertes es menos susceptible o propensa para las actividades degradativas, tales como el crecimiento de microorganismos y las reacciones químicas de hidrólisis, que el agua débilmente asociada. El término “actividad de agua” (a_w) se implantó para tener en cuenta la intensidad con que el agua se asocia a los diferentes compuestos no acuosos (Fennema, 2000).

2.4. ACTIVIDAD DEL AGUA (a_w).

La actividad de agua (a_w) es un parámetro que indica la disponibilidad de agua en un alimento para que existan reacciones químicas, bioquímicas (por ejemplo oxidación de lípidos, reacciones enzimáticas, reacciones de Maillard) y desarrollo microbiano (Fennema, 2000), citado por (Pulla, 2012), La mayoría de los microorganismos presentes en los alimentos proliferan a valores de a_w elevados siendo generalmente aceptado que el crecimiento de la mayor parte de las bacterias cesa por debajo de a_w de 0,90 (Karel, 1976). Así, si la a_w disminuye, pocos géneros de microorganismos van a ser capaces de multiplicarse sobre/o en los alimentos (Leisther y Rodel, 1976).

Sin embargo, también se ha observado que diversos alimentos con el mismo contenido de agua difieren totalmente en estabilidad microbiológica. Esta observación llevó al descubrimiento de que no es el contenido de humedad el parámetro que controla la estabilidad microbiológica. Por ejemplo huevo y leche deshidratada dejan de ser estables cuando la humedad excede de un 12%, mientras que los cereales sólo cuando la humedad sube de un 14%, y la fruta seca cuando la humedad es mayor a 18% (Torres, 1991, citado por Espino, 1995).

En consecuencia, el contenido de agua por sí solo, no es un indicador fiable de la alterabilidad. Esta inadecuación puede atribuirse, en parte, a diferencias en la intensidad con que las moléculas de agua se asocian con los constituyentes no acuosos, ya que el agua que interviene en asociaciones fuertes es menos capaz de participar en actividades degradativas, tales como el crecimiento de los microorganismos y las reacciones químicas hidrolíticas. El término "Actividad del Agua" (a_w) fue desarrollado para tener este factor en consideración. Este término, aunque mucho mejor indicador de la alterabilidad de los alimentos que el contenido de agua, tampoco es aún perfecto, puesto que otros factores, tales como concentración de oxígeno, pH, movilidad del agua y el tipo de soluto presente, pueden, en algunos casos, ejercer fuertes influencias sobre la velocidad de degradación. No obstante, la

actividad del agua se correlaciona suficientemente bien con las velocidades de muchas reacciones degradativas como para que su medida y uso sean valiosos (**Fennema, 1993**, citado por **Espino, 1995**).

La medida del valor del Actividad de Agua es una herramienta de predicción de la estabilidad física, química y microbiológica, y por consiguiente, de la vida útil de los alimentos (**Labuza, 1980**), citado por (**Viccina, 2006**).

De acuerdo a lo explicado, el agua pura, que no tiene ninguna sustancia soluble que ligue el agua, tendrá una actividad de agua igual a uno ($a_w = 1.0$), un alimento que no tenga nada de agua, tendrá una actividad igual a cero ($a_w = 0$).

$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{HR}{100} = N = \frac{n_1}{n_1+n_2} \quad (\text{Ec.1})$$

donde:

- P : Presión de vapor de la disolución.
- P_0 : Presión de vapor del solvente puro.
- HR : Humedad relativa de equilibrio (%) en torno al producto.
- N : Fracción molal del solvente (agua).
- n_1 : Moles del solvente.
- n_2 : Moles del soluto.

El término n_2 puede determinarse midiendo el punto de congelación de la muestra y empleando entonces la relación:

$$n_2 = \frac{G \cdot \Delta T_f}{1000 K_f} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

- G : Gramos del solvente de la muestra.
- T_f : Es la depresión del punto de congelación (C°).
- K_f : Constante de depresión del punto de congelación molal del agua (1.86).

Es conveniente resaltar que la actividad del agua es una propiedad intrínseca de la muestra, mientras que la humedad relativa de equilibrio es una propiedad de la atmósfera en equilibrio con la muestra (Fennema, 1993, citado por Espino, 1995).

En la actualidad, las determinaciones de la actividad del agua son una práctica muy común en los laboratorios de alimentos. Esto resulta de un aumento en el reconocimiento de la importancia de la actividad del agua en la caracterización del estado del agua en alimentos, especialmente su disponibilidad para los cambios biológicos, físicos y químicos. Por esto la actividad de agua es un parámetro bastante usado como indicador para predecir la vida útil de un alimento (Vega *et al*, 2006).

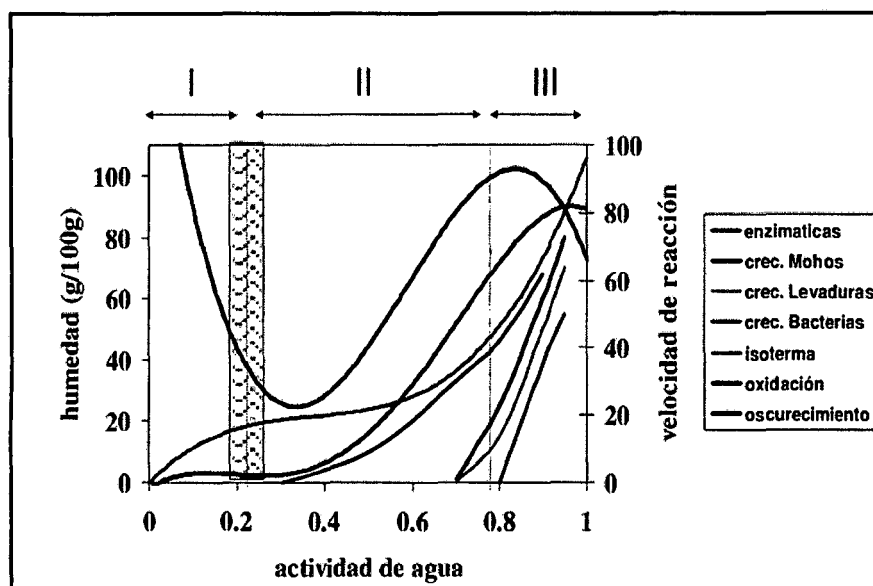


Figura 02: Cambios que Ocurren en Alimentos en Función del Contenido de agua.
Fuente: Ponce, 2005

2.5. ISOTERMAS DE SORCIÓN

La isoterma de un producto relaciona gráficamente, a una temperatura constante, el contenido en humedad de equilibrio de un producto 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, 1996).

Las isotermas de sorción de agua se describen usualmente como un ploteo de la cantidad de agua absorbida como una función de la actividad del agua (a_w), con un aumento, en la mayoría de los casos pero no en todos, en una curva sigmoidea (Iglesias y Chirife, 1982, citado por Espino, 1995).

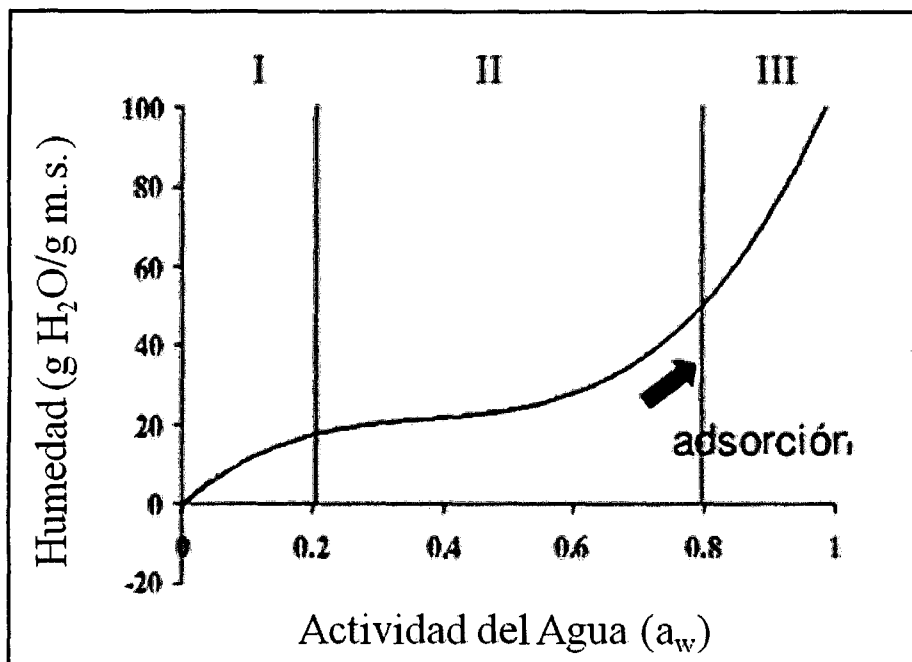


Figura 03: Isoterma de Sorción de Humedad de Equilibrio Generalizada para el Rango de Baja Humedad de un Alimento (20°C).

Fuente: Ponce, 2005

2.5.1. ZONAS EN LA ISOTERMA DE SORCIÓN

Fennema (1993), menciona que para comprender el significado y utilidad de las isotermas de sorción, a veces conviene dividir las en tres zonas, como se aprecia en la figura N° 03.

a. El agua presente en la zona I corresponde desde 0 a 25 unidades de actividad de agua (**Jamieson y Jobber, 1970**), además **Cheftel y Cheftel (1976)**, mencionan que esta zona es denominada agua fuertemente ligada. Esta agua está absorbida a sitios polares accesibles por interacciones agua-ión o agua-dipolo. **Fennema (1993)**, menciona que estos sitios polares son especialmente grupos NH_2^+ y COO^- de las proteínas y de los grupos OH^- de los almidones y probablemente, también el agua de cristalización de las sales y azúcares.

El final de mayor humedad de la zona I (el límite de las zonas I y II) corresponde al contenido de humedad “monocapa” del alimento. Al contrario de lo que puede inferirse del nombre, la monocapa no significa la cobertura de toda la materia seca por una capa simple de moléculas de agua densamente empaquetadas, no comprendiéndose plenamente su significado exacto a nivel molecular, probablemente la mejor interpretación es considerar el valor monocapa como la cantidad de agua necesaria para formar una monocapa sobre los grupos altamente polares y accesibles de la materia seca, quizá sobre la base aproximada de 1 mol de agua por 1 mol de grupos altamente polares. En otro sentido, el valor monocapa corresponde a la cantidad máxima de agua que puede estar muy fuertemente ligada a la materia seca (**Fennema, 1993**).

Cheftel y Cheftel (1976), reportan que la energía de adsorción del agua de esta monocapa es del orden de 1 a 15 Kcal/mol, esto explica que el agua de esta capa sea relativamente difícil de extraer y no está disponible para actuar como disolvente.

b. Esta zona II según **Jamieson y Jobber (1970)**, se encuentra en el rango de 0.25 a 0.75 unidades de actividad de agua. Esta zona es denominada agua débilmente ligada. El agua de la zona II de la isoterma consta del agua de la zona I más el agua añadida (procedimiento de resorción) confinada de la zona II. El agua añadida de la zona II ocupa los restantes sitios de la primera capa y varias capas adicionales en torno a los grupos hidrofílicos del sólido, designándose agua multicapa; el agua multicapa se asocia con las moléculas vecinas principalmente por enlaces de hidrógeno agua-agua y agua-soluto (**Fennema, 1993**).

c. El agua de la zona III de la isoterma consta del agua de las zonas I y II más el agua añadida (procedimiento de resorción) dentro de los confines de la zona III. Esta zona es denominada agua en capilares y agua libre (Matos, 1992). El agua añadida de la zona III es el agua menos fuertemente ligada y más inmóvil (molecularmente) de los alimentos. Esta agua es utilizable como solvente y suficientemente abundante y normal como para permitir que las reacciones químicas y el crecimiento microbiano ocurran rápidamente (Fennema, 1993).

Jamieson y Jobber (1970), indican que la zona III, mostrada en la figura 03, está comprendida en el rango de 0.75 a 0.99 unidades de actividad de agua.

Matos (1992), menciona que esa zona está comprendida por agua presente en multicapas de proteínas y polímeros de carbohidratos, además la presión de vapor de agua es reducida por los solutos disueltos como aminoácidos libres, azúcares y/o atracción capilar en la micro estructura.

Debe resaltarse que las fronteras que separan las zonas de la isoterma no pueden establecerse con exactitud. Además la adición de agua a un material seco puede alterar algo las propiedades del agua que ya está presente (procesos de disolución e hinchamiento de matriz) conceptualmente es útil considerar que el agua de la zona I permanece casi constante al añadir el agua de la zona II y que el agua de la zona II permanece casi constante al añadir el agua de la zona III (Fennema, 1993).

2.5.2. CLASIFICACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE SORCIÓN

En la figura 4 se presenta la clasificación de isotermas según Brunnauer, Deming y Teller (1940), citado por Mathlouthi, (2003), el tipo 1 corresponde a la isoterma de Langmuir que describe la adsorción monomolecular de gas sobre un sólido poroso, el tipo 2 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 3 o de Flory-Huggings se encuentra en la adsorción de un disolvente o plastificante como el glicerol. El tipo 4 muestra la adsorción por un sólido hidrófilo “hinchable”, hasta que se alcanza el

máximo de sitios de hidratación. Finalmente el tipo 5 llamado isoterma BET que representa la adsorción multimolecular observada en la adsorción de vapor de agua sobre carbón. Los perfiles de isotermas más frecuentes en alimentos son los tipos 2 y 4.

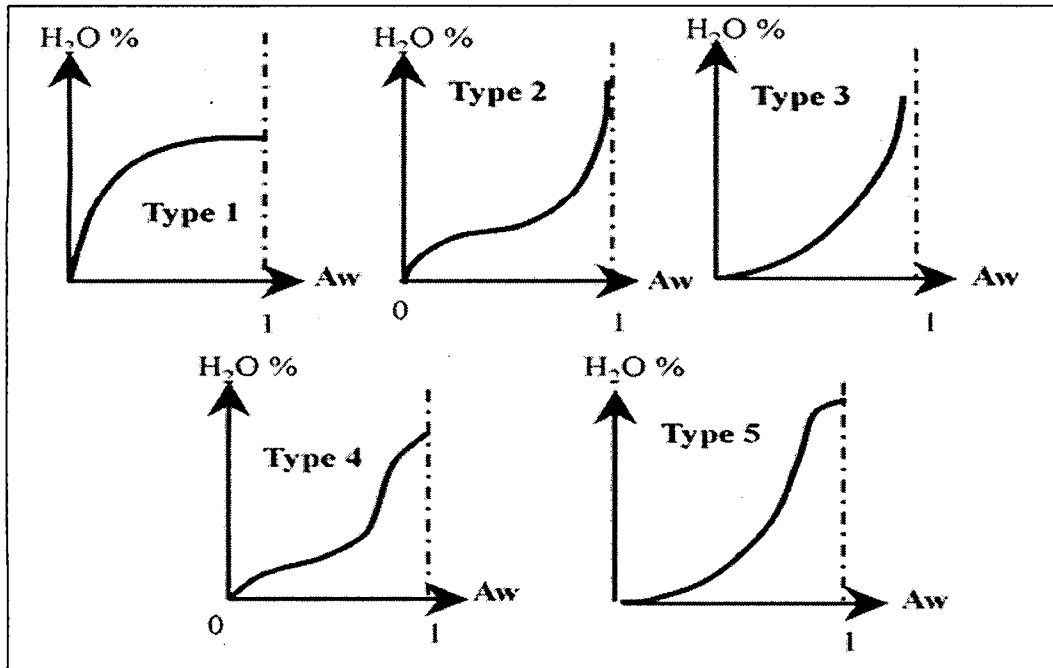


Figura 04: Los cinco tipos de Isotermas.

Fuente: Brunnauer, Emmett, y Teller (1938), citado por Mathlouthi, (2003).

2.5.3. ADSORCIÓN.

Se ha investigado durante largos años éste fenómeno llegándose a establecer claramente dos tipos de adsorción: química y física.

Según Mysels (1967), se trata de un fenómeno físico-químico por el cual un elemento, sea líquido, gaseoso o sólido, ha pasado a adherirse en la superficie de un sólido o de un líquido, con la cual puede reaccionar (adsorción química) o sólo condensarse (adsorción física).

La adsorción química implica transferencia de electrones entre el adsorbente y el adsorbato, característica clásica de una reacción química. En cambio, la adsorción física es causada por fuerzas atractivas de Van der Waals entre moléculas polares (dipolos) o también dentro de una situación de inducción dipolar. Esta adsorción es de carácter similar a la condensación de moléculas de vapor sobre un líquido de la misma composición (Satterfield, 1991, citado por Viccina, 2006).

Para el caso de los alimentos la adsorción es de tipo físico (Sifuentes, 1992), es decir, se trata de una adsorción física del vapor de agua por los alimentos.

Cabe también hacer la diferenciación entre absorción y adsorción. La adsorción, a diferencia de la absorción, se da cuando el elemento o sustancia está disuelto y compenetrado o atrapado dentro del sólido, por ejemplo, tenemos la absorción del hidrógeno por el paladio. Esta diferencia entre absorción y adsorción es evidente en ciertos casos, pero en otros, especialmente cuando la materia adsorbente es un sólido muy poroso con amplia superficie interna, la distinción entre adsorción y absorción es muy difícil.

2.5.3.1. FACTORES EN LA ADSORCIÓN:

Entre los principales elementos que influyen en la adsorción podemos mencionar:

a) Temperatura

La reacción entre el adsorbente y el material adsorbido es a veces lenta (Adsorción química) y necesita una elevada energía de activación. De las muchas partículas que llegan a la superficie y se adhieren a ella por fuerzas de Van der Waals, muy pocas adquieren la suficiente energía por casuales colisiones y llegan a ser adsorbidas químicamente. Este tipo de adsorción es dependiente de la temperatura (Mysels, 1967).

La temperatura del sistema aumenta cuando las fuerzas de la adsorción son tan grandes que pueden liberar una gran cantidad de energía en el mismo instante en que ocurra el fenómeno.

En la adsorción física, si se eleva la temperatura del medio, la capacidad de saturación por vapor de un medio aumenta. Es decir, la cantidad de gas físicamente adsorbido decrece.

A una temperatura constante la humedad relativa de un medio decrece si la cantidad o presión parcial de vapor de agua de éste disminuye. Cuando el calor es eliminado por radiación, conducción y convección, baja el nivel de la temperatura de la superficie y la adsorción alcanzará un valor final de equilibrio.

b) Presión

Este factor es clave en la adsorción de agua en un sólido, sabemos que el agua se adsorbe en función al valor de la gradiente de presión parcial de vapor entre el agua y el sólido.

Es lógico considerar que la adsorción se da cuando la presión parcial del vapor de agua en el medio es mayor que la presión parcial de vapor de agua en el sólido. Es decir, sucede una migración de moléculas de agua hacia la superficie del sólido hasta que ambas presiones se equilibren (adsorción positiva).

Cuando la presión parcial del vapor de agua en el medio es menor que la presión parcial de vapor de agua en el sólido, ocurre una pérdida de moléculas de agua por parte del sólido (adsorción negativa).

c) Polaridad

Es importante considerar la polaridad de las moléculas del material adsorbido y del adsorbente.

Existen moléculas polares y no polares. En el caso de una molécula polar adsorbida en una determinada superficie, su orientación será totalmente no aleatoria. Asimismo, moléculas no polares y simétricas cuando son adsorbidas, resultan firmemente retenidas por fuerzas de Van der Waals (Mysels, 1967, citado por Viccina, 2006).

Estas fuerzas se generan a partir de dipolos inducidos. Esto lo explica **Adamson (1997)**, en base a la teoría de polarización: en la adsorción de moléculas no polares la superficie del adsorbente induce a la formación de dipolos en la primera capa adsorbida, y ésta a su vez induce los dipolos en la siguiente capa adsorbida y así sucesivamente. **Adamson (1997)**, señaló que la polarización de las capas debe ser vista como un fenómeno en que intervienen fuerzas de Van der Waals.

En el caso del agua y los alimentos, el adsorbato (agua) es de naturaleza polar y el adsorbente es bastante heterogéneo en polaridad, lo cual nos llevaría a deducir que el fenómeno de polaridad se llevará a cabo entre el agua y los sitios más polares del alimento. Esta hipótesis del comportamiento fisicoquímico del adsorbato y adsorbente en un fenómeno de sorción en alimentos, ha sido respaldada por los resultados de los trabajos de investigación de **Pauling (1945)**, **Mc Laren et al. (1952)**, **Cardew y Eley (1958)**, y **Heldman et al. (1965)**, citados por **Oviedo (1969)**.

d) Área de adsorción

Los diferentes métodos para determinar el área superficial de un sólido se basan en la medida de algunas de sus propiedades, y por lo tanto los resultados que se obtienen difieren. Según **Adamson (1997)**, el problema consiste en que no se puede establecer un concepto absoluto del área superficial, ya que se hace cada vez más difícil conforme se la examina con más detalle. Por lo tanto, es arbitrario el tratar de definirla con un determinado método y con un valor absoluto. Nótese que cuanto más refinados son los métodos de determinación se halla más y más área superficial de un determinado sólido. Tal vez por ello la más próxima o cercana alcance a un área absoluta que está dada por el área geométrica de una superficie plana líquida.

Según **Adamson (1997)** en el caso de sólidos existe la dificultad de que la superficie de átomos y moléculas difieren en sus propiedades dependiendo del lugar en que se encuentren (posición con respecto a moléculas vecinas) y por ello la superficie de los átomos

puede permanecer casi indefinidamente en posición inestable variando sus propiedades de acuerdo al plano expuesto. Como la energía y entropía de una molécula en la región superficial no son necesariamente proporcionales entre ellas, la presencia de configuraciones inestables en la superficie puede afectar la energía libre y la energía total de la superficie en forma diferente. En casos en que la adsorción depende de la energía superficial o de los espacios interatómicos, la cantidad de material adsorbido en una serie de muestras hipotéticas de sólidos de igual área total pero diferentes en energía superficial puede ser muy distinta. En tales casos, aún las cantidades relativas adsorbidas en las diferentes muestras no sería una medida de sus áreas relativas. Felizmente se tiene mayor interés en estas áreas de superficies relativas que en valores absolutos.

Mysels (1976), tiene toda una teoría sobre cómo serían los mecanismos de un fenómeno de adsorción en una superficie no plana. La adsorción en una superficie no plana que tiene cráteres y capilares es favorecida porque la superficie tiende a ser rodeada por moléculas adsorbidas que son tomadas más fuertemente. Este efecto continúa cuando las capas de moléculas cubren sucesivamente la superficie, dando un menisco cóncavo, con lo que se favorece el relleno del capilar. Esto es el denominado fenómeno de condensación capilar, el cual es de suma importancia y sucede con frecuencia en la adsorción de vapores, a presiones parciales y altas, por materiales porosos. Cuando la condensación capilar es significativa, el volumen máximo adsorbido está perfectamente correlacionado con el volumen total de los poros del adsorbente.

Mysels (1967), observó que las superficies convexas de un líquido, tal como la de una gota, tiene una mayor presión de vapor que una superficie plana. Inversamente, en una superficie cóncava, por ejemplo la superficie del agua contenida en un capilar, tiene una menor presión de vapor que las anteriores. Desde el punto de vista molecular se puede apreciar perfectamente que una molécula es cada vez más rodeada por moléculas vecinas conforme la superficie cambia de la forma convexa a la cóncava; consecuentemente, en esta última forma habrá, para cada molécula, mayor posibilidad de interacción, y por lo tanto menor tendencia a evaporar y menor presión de vapor. En una gota la tensión superficial ejerce una presión

positiva, mientras que un menisco cóncavo ejerce una presión negativa; estas presiones suben y bajan la presión de vapor respectivamente.

En condiciones constantes, la cantidad adsorbida, por el sustrato, es proporcional a la superficie disponible y generalmente al peso del adsorbente. Es así que la cantidad adsorbida es expresada, por lo general, por unidad de peso, tal como gramos o moles de agua por gramo de adsorbente. También puede ser expresada en términos de coberturas mono moleculares o porcentaje de cobertura, cuando la superficie adsorbente es conocida.

2.5.4. INTERÉS DE LAS ISOTERMAS DE SORCIÓN PARA LA TECNOLOGÍA ALIMENTARIA

Las isotermas de sorción de humedad son importantes para la tecnología alimentaria por varios motivos:

a) Permite conocer la humedad de equilibrio, ya que ésta es una propiedad muy importante que tiene un impacto significativo dentro del manipuleo, procesamiento y almacenamiento de todos los productos higroscópicos. **Hutchinson y Otten (1984)**, mencionan que la humedad de equilibrio es el contenido de humedad en la cual la presión de vapor de agua del producto y la atmosférica se igualan y no ocurre adsorción y desorción.

b) Las isotermas de sorción dan la posibilidad de prever el comportamiento de un alimento después de su tratamiento o almacenamiento en unas condiciones distintas a las que se estudió experimentalmente (**Cheftel y Cheftel, 1976**).

c) El cálculo de sitios activos y la superficie efectiva de un producto es de vital importancia para la adsorción de sustancias volátiles o gaseosas (**Bornhardt y Vidal, 1991**).

d) En ingeniería, una isoterma de desorción es útil para predecir el tiempo de deshidratación de un alimento y estimar la energía requerida para el proceso de secado (**Bornhardt y Vidal, 1991**).

e) Para el análisis del comportamiento de sorción de mezclas de alimentos complejos, frecuentemente es deseable calcular la isoterma de sorción de la mezcla; en algunos casos, esto es posible a partir del conocimiento de las isotermas de los componentes y las fracciones en peso de los componentes (Iglesias *et al.*, 1980, citado por Iglesias y Chirife, 1982). En la formulación de alimentos deshidratados de varios componentes, tales como sopas o salsas secas, la isoterma de sorción de cada componente debe ser conocida para predecir y evitar una transferencia de agua indeseable desde las sustancias de alta actividad de agua hacia las de baja actividad de agua. Salwain y Slawson (1959), citado por Iglesias y Chirife (1982), desarrollaron un procedimiento, el cual está basado en la idea de que en el equilibrio todos los productos tienen la misma actividad del agua, las porciones de las isotermas de cada componente se aproximan por líneas rectas y pendientes evaluadas para calcular la actividad del agua de equilibrio.

2.5.5. MODELOS MATEMÁTICOS DE ISOTERMAS DE SORCIÓN EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA, HUMEDAD Y ACTIVIDAD DE AGUA.

Se han propuesto diversos modelos teóricos, semi teóricos y empíricos que permiten expresar el contenido de humedad de equilibrio de los alimentos. Si bien los modelos teóricos involucran los principios físicos de sorción de humedad, algunas de las suposiciones realizadas en el desarrollo de las ecuaciones permiten simplificaciones que pueden resultar en predicciones teóricas inadecuadas de los valores de a_w (Brooker *et al.*, 1974), citado por (Sandoval *et al.*, 2002).

Muchas ecuaciones matemáticas han sido reportadas en la literatura, para describir las isotermas de sorción de agua en productos alimenticios. Cada modelo empírico, semi empírico o teórico, ha tenido algún éxito en reproducir los datos de contenido de humedad de equilibrio. Sin embargo, ninguno de ellos ha sido capaz de dar resultados exactos a través del rango total de actividad de agua y para diferentes tipos de alimentos. Esto es principalmente porque la sorción de humedad de isotermas de productos alimenticios representa la propiedad higroscópica integral de los componentes y la depresión de actividad de agua es debida a la

combinación de factores, cada uno de los cuales pueden ser predominantes en cada rango de actividad de agua, dice (Matos, 1992), citado por Viccina, 2006).

Las ecuaciones utilizadas en el presente trabajo para describir el comportamiento de las curvas de adsorción de humedad de las muestras de harina de plátano verde, son mostradas a continuación.

2.5.5.1. Modelo de BET - Brunauer, Emmet y Teller (1938)

Es la más utilizada y proporciona un buen ajuste para una variedad de alimentos sobre una región de actividad de agua entre 0.05 y 0.45, siendo expresado de la siguiente forma (Rizvi, 1986, citado por Gabas, 1998).

$$X_e = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w) (1 + (C - 1) a_w)} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

X_e = Contenido de humedad (b.s.)

a_w = Actividad de agua.

X_m = Contenido de humedad de la monocapa (b.s.).

C = Constante de BET relacionada al calor de sorción.

2.5.5.2. Modelo de GAB – Guggenheim, Anderson y De Boer (1984).

Postulando que el estado de las moléculas de sorbato en la segunda capa y superiores son iguales entre sí, pero diferentes a aquellas del estado líquido, estos autores introducen una segunda etapa de sorción de moléculas de sorbato bien diferenciada. Esta ecuación se aplica en la tecnología de alimentos y es conocida por el acrónimo GAB (por Guggenheim, Anderson, de Boer). (Zug, 2002a).

Es una ecuación de tres parámetros, utilizado para ajustar los datos de sorción de productos alimenticios con actividades de agua de 0.9 (Lima, 2006). Este modelo es de amplio uso en alimentos y es recomendado por el Proyecto Europeo COST 90, que trata sobre propiedades físicas en alimentos. Esta ecuación está basada en la teoría de adsorción de BET, la cual da una explicación física a los parámetros involucrados en ella (Kiranoudis *et al.*, 1993, citado por Vega *et al.*, 2006).

La isoterma de GAB ha sido satisfactoriamente probada en datos de adsorción de gases, como en absorción de vapor soluciones altamente concentradas de electrolitos, alimentos, proteínas y otros materiales.

Lomauro *et al.* (1985), citado por Lima (2006), verificaron que el modelo de GAB puede representar con gran precisión más del 50% de las isotermas de frutas, vegetales y carnes, en comparación con las ecuaciones de dos parámetros. Este modelo contiene una tercera constante k , que mide la diferencia de potencial químico estándar entre las moléculas de esta segunda etapa y aquellas del estado líquido puro. Si k es menor a la unidad, se estimará una sorción menor a la predicha por BET. (Zug, 2002a).

$$X_e = \frac{X_m \cdot C \cdot k \cdot a_w}{(1 - ka_w) (1 - ka_w + Cka_w)} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

a_w = Actividad de agua.

X_e = Humedad de equilibrio.

X_m = Humedad de la monocapa molecular.

C = Constante de Guggenheim, característica del producto y relacionado con el calor de adsorción de la monocapa.

k = Factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa.

2.5.5.3. Modelo de Halsey (1948)

Este modelo es utilizado para analizar isotermas de sorción de diversos alimentos, mostrando un buen ajuste para productos ricos en almidón, como el maíz, papa y trigo, para valores de a_w que se encuentran entre 0.1 a 0.8; es así que **Halsey (1985)**, citado por **Lima (2006)**, desarrollo un modelo matemático que considera la condensación de las multicapas a una distancia relativamente grande de la superficie, asumiendo que la magnitud del parámetro B caracteriza el tipo de interacción entre el vapor y el sólido, pues si B es grande, la atracción entre el sólido es muy específica y no se extiende muy lejos de la superficie, si por el contrario B es pequeño, las fuerzas de atracción predominantes son de Van der Waals y capaces de llegar a grandes distancias de la superficie.

Siendo A, B constantes que dependen de la temperatura y naturaleza del producto, presentando de esta manera la siguiente ecuación:

$$a_w = \exp \left[\frac{-A}{X_e B} \right] \quad (\text{Ec. 5})$$

2.5.5.4. Modelo de Oswin (1946)

El modelo Oswin es empírico, basado en la expresión matemática para la curva de forma sigmoidea, y se ajusta bien entre $0,0 < a_w < 1,0$. Con apenas dos constantes es de fácil linealización, mostrando las ventajas respecto a los modelos cinéticos GAB y BET (**CHINNAN & BEAUCHAT, 1985**). Según **Lomauro (1985)**, citado por **Lima (2006)**, que este modelo se ajusta alrededor del 57% de las isotermas de los alimentos. Esta ecuación fue utilizado por **Boquet et al. (1978)** para treinta y nueve productos y es adecuada para alimentos con alto contenido de almidón, además de ser considerado una de las más versátiles ecuaciones de dos parámetros.

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

Donde:

X_e = Humedad de equilibrio.

a_w = Actividad de agua.

A y B = Parámetros de ajuste del modelo.

2.5.5.5. Modelo de Chung-Pfost (1967)

La ecuación de Chung-Pfost es la que mejor expresa el contenido de humedad de equilibrio de granos en gamas más amplias de temperatura y humedad relativa. Las modificaciones empíricas mejoraron sustancialmente dicha ecuación y la hicieron aplicable a una mayor parte del abanico de temperaturas y humedades relativas. (Almache y Gallegos, 2006).

La ecuación de Chung-Pfost (Chung et al., 1967) se desarrolló para cereales, y se basa en considerar que los cambios de energía libre durante el proceso de adsorción están relacionados con el contenido de humedad del producto. La inclusión de la temperatura en la ecuación anterior excluye la evaluación de la dependencia de la temperatura de los parámetros A y B. Young (1976) utilizó esta ecuación, junto con otras, para describir las isotermas de adsorción y desorción de los cacahuets tipo Virginia. Esta ecuación se adapta bien para valores de a_w entre 0.30 y 0.70. (Almache y Gallegos, 2006).

$$a_w = \exp \left[\frac{A}{RT} \exp (-BX_e) \right] \quad (\text{Ec. 7})$$

2.5.6. CALIDAD DE AJUSTE DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.

La calidad del ajuste de los modelos propuestos se evaluó por medio del coeficiente de correlación lineal (R^2), el que debe ser superior a 0,85 para conseguir un buen modelado de los datos experimentales y por el porcentaje de error medio relativo (%E), parámetro estadístico ampliamente utilizado en isotermas de alimentos.

$$(\%)E = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|X_{ei} - X_{ci}|}{X_{ei}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

X_{ei} es el contenido de humedad experimental (g agua/g m.s.)

X_{ci} es el contenido de humedad calculada a partir de cada modelo (g agua/g m.s.)

n es el número de observaciones.

Iglesias y Chirife (1982), mencionan que normalmente, se usan 8 ó más valores para determinar $(\%)E$. **Lomauro et all (1985)** e **Iglesias y Chirife (1980)**, mencionan que un $(\%)E$ igual o menor a 5 se considera como buen ajuste a los datos de sorción.

Iglesias y Chirife (1982), indican que la información estadística es muy útil cuando se analiza la bondad de ajuste de una ecuación en particular, por que conjuntamente con la media, la desviación porcentual relativa se define adecuadamente y precisa el grado de éxito en la ecuación de isoterma propuesta.

2.5.7. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE ISOTERMAS DE SORCIÓN

Gal (1975), citado por **Feitosa (1998)**, al revisar la literatura hizo una clasificación de las técnicas para la medición de las isotermas de sorción de toda clase de materiales sólidos (Tabla N° 02). Las isotermas de sorción pueden ser determinadas de acuerdo a dos principios básicos: el gravimétrico y el manométrico o higrómetro. Así mismo, la adición de un tercer grupo suplementario se hace necesario para acomodar métodos especiales aplicables bajo condiciones extremas (alta actividad de agua), los cuales usualmente no se ajustan con la clasificación de los otros dos grupos.

El principio del método gravimétrico es la determinación de variaciones en el peso de las muestras en equilibrio con diferentes presiones de vapor de agua. Numerosos laboratorios vienen usando el método gravimétrico estático por ser la técnica más simple, a pesar de la

demora en su determinación. La humedad de equilibrio entre el producto y la atmósfera circundante es alcanzada sin movimiento del aire. En el método dinámico el aire o el producto permanecen en movimiento hasta que se alcance el equilibrio. El método manométrico es utilizado en procesos de control de calidad, para la determinación rápida de la actividad de agua. Los métodos especiales, son métodos no convencionales que utilizan una membrana de célula de presión, para determinar la actividad de agua en materiales con alto contenido de humedad.

Tabla N° 02: Métodos para la determinación de las isotermas de sorción.

1. Métodos gravimétricos

- 1.1. Método con registro continuo de cambios de peso
 - a) Sistemas al vacío.
 - b) Sistemas dinámicos.
- 1.2. Método con registro discontinuo de cambios de peso
 - a) Sistemas estáticos.
 - b) Sistemas dinámicos.
 - c) Sistemas al vacío.

2. Métodos manométricos o higrómetros

- 2.1. Métodos manométricos
- 2.2. Métodos higrométricos

3. Métodos especiales

Fuente: Gal (1981), citado por Feitosa (1998).

2.6. CALOR ISOSTÉRICO DE SORCIÓN

El calor isostérico es un parámetro de mucha utilidad en los procesos de adsorción y desorción de agua en alimentos. (Vega *et al.*, 2006). Mientras que Rizvi (1995), citado por Vega *et al.*, 2006, menciona que en los procesos de deshidratación representa la energía requerida para romper las fuerzas moleculares entre las moléculas de vapor de agua y la superficie del adsorbente, y cuando ocurren fenómenos de adsorción de agua corresponde a la energía necesaria para que ocurra lo inverso.

El calor isostérico de sorción es un diferencial molar cantidad derivada de la dependencia de la temperatura de la isoterma. Este enfoque asume que el calor neto isostérico es invariable con la temperatura y la aplicación de este método requiere la medición de las isotermas de sorción en dos o más temperaturas (Telis *et al.*, 2005).

El calor isostérico neto de sorción (q_{st}) se define como el calor total de sorción de agua del alimento (Q_{st}) menos el calor de vaporización de agua pura (λ), a una determinada temperatura. Un método largamente utilizado para calcular el calor isostérico de sorción, sea para el proceso de adsorción o para el de desorción, está dado por la ecuación de Clausius-Clapeyron (Ecuación 9) (Telis *et al.*, 2005).

$$\left. \frac{\partial \ln(P/P_0)}{\partial (1/T)} \right|_X = \left. \frac{\partial \ln(a_w)}{\partial (1/T)} \right|_X = - \frac{Q_{st} - \lambda}{R} = - \frac{q_{st}}{R} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

- Q_{st} = Calor isostérico total de sorción (KJ/mol).
- q_{st} = Calor isostérico neto de sorción (KJ/mol).
- λ = Calor de vaporización del agua pura (KJ/mol).
- R = Constante universal de los gases, $8.314 \text{ KJ}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Integrando la ecuación (9) y, asumiendo que el calor isostérico líquido de sorción es independiente de la temperatura, se tiene la siguiente expresión:

$$\ln \frac{a_{w2}}{a_{w1}} \Big|_x = \frac{q_{st}}{R} \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde a_{w1} y a_{w2} son las actividades de agua a las temperaturas T_1 y T_2 (K), respectivamente al contenido de humedad.

Para **Tsami et al. (1990)**, el conocimiento de la dependencia del calor de sorción del agua en función del contenido de humedad es esencial en el estudio de varios procesos con alimentos, pudiendo ser usados para estimar las necesidades energéticas del proceso de secado, proporcionando datos importantes sobre el estado del agua en los productos alimenticios. Siendo así que **Tsami et al. (1990)**, utilizaron la siguiente relación exponencial empírica entre el calor de sorción y el contenido de humedad para algunas frutas secas, propuesta de la siguiente manera:

$$q_{st} = q_0 \exp\left(-X_e/X_0\right) \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

q_0 = Calor isostérico de sorción de la primera molécula de agua (KJ/mol).

X_e = Contenido de humedad de equilibrio (g agua/g m.s.).

X_0 = Contenido de humedad inicial del material alimenticio (g agua/g m.s.).

Cuando se grafica las isotermas de adsorción como el logaritmo natural de la actividad de agua contra el inverso de la temperatura absoluta, para determinados valores de humedad de una muestra, obteniéndose la correspondiente pendiente $-q_{st}/R$ (Figura 5) y de esta forma se puede calcular el valor de q_{st} (**Zhang et al., 1996**, citado por **Gabas, 1998**).

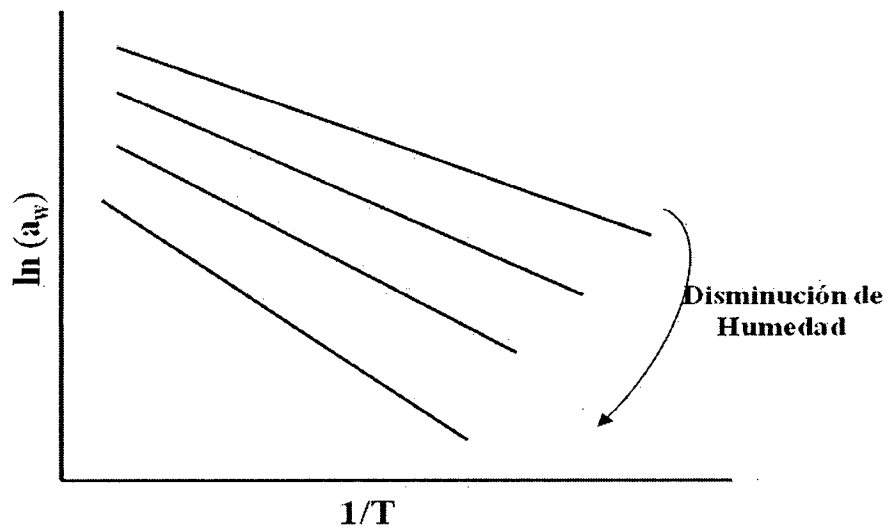


Figura 05: Curvas de logaritmo natural de la actividad de agua, para específicos valores de contenido de agua de equilibrio, en función de valores de $1/T$ (K^{-1}).

Fuente: Correa *et al.*, 2005.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

El trabajo de investigación, se desarrolló en el Laboratorio de procesos Agroindustriales, de la Escuela profesional de Ingeniería Agroindustrial – Facultad de Ingeniería y en el Laboratorio de Química, ambos pertenecientes a la Universidad Nacional amazónica de Madre de Dios – Puerto Maldonado, durante los meses de febrero a abril del 2011, así mismo, la última parte de la investigación se solicitó una corrida para obtener los resultados del análisis proximal de la harina de plátano en el laboratorio de Tecnología de Alimentos de la carrera profesional de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco – Cusco, durante el mes de enero del 2012.

3.2. MATERIALES

3.2.1. Materia Prima

El material utilizado en la presente investigación fue el plátano verde (*Musa paradisiaca L.*) conocido popularmente en nuestra región como “plátano común”, que es ampliamente utilizado en nuestros principales mercados de abasto para la preparación del menú diario de los hogares y para los restaurantes de comidas típicas. El material de estudio fue cosechado del predio del Sr. Vicente Miranda Serrano, ubicado en la comunidad de Sudadero en el Km. 26 de la carretera Puerto Maldonado Planchón de la Provincia de Tambopata, Distrito Las Piedras del Departamento de Madre de Dios.

3.2.2. Reactivos (Sales)

- Cloruro de Litio (LiCl)
- Acetato de Potasio (KC₂H₃O₂)
- Cloruro de Magnesio (Mg Cl₂)
- Nitrato de Magnesio (Mg (NO₃)₂)
- Cloruro de Sodio (NaCl)
- Cloruro de Potasio (KCl)
- Carbonato de Potasio (K₂ CO₃)

3.2.3. Equipos de Laboratorio

- Incubadora, marca MEMMERT, modelo INB-400, T°; 0-70°C
- Estufa, marca TOMOS, modelo ODHG-9053^a. T°: 0-200°C. precisión ± 1°C
- Balanza analítica, marca AND, OHAUS ADVENTURER, modelo AR 2140, rango: 0-210 gr., precisión ± 0.00001gr.
- Balanza de precisión, marca GEHAK, rango: 0.2gr – 6100gr. Precisión ± 0.1 gr.

3.2.4. Materiales

- Frascos de vidrio.
- Placas petri, marca KIMBLE USA
- Recipientes de plástico (Taper) de 680 ml, marca M&R.
- Termómetro de mercurio (rango: 0-100°C).
- Probeta de y 100±1 ml., marca: GIARDINO Italy.
- Piceta con agua destilada.
- Bandejas de malla metálica.
- Pinzas.
- Espátula.
- Guantes quirúrgicos.
- Mascarillas.
- Bolsas de polietileno.
- Campana desecadora.
- Lentes de seguridad, marca KAMASA.
- Cinta aislante, marca 3M.

3.2.5. Soluciones Químicas de Desinfección

- Alcohol de 96°, Laboratorios LACOPPER S.A.C.
- Hipoclorito de sodio al 7.5%.
- Formol al 40%, Laboratorios LACOPPER S.A.C.

3.3. METODOLOGÍA

3.3.1. Caracterización de la materia prima

El análisis fisicoquímico de la muestra de harina de plátano verde, se solicitó el servicio al Laboratorio de Análisis Químico de la Facultad de Ciencias Químicas, Físicas y matemáticas de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco – UNSAAC. Los análisis realizados y sus respectivas normas de determinación son mostrados en la tabla.

Tabla N° 03: Tipos de análisis fisicoquímicos realizados en la harina de plátano y sus respectivas normas de determinación.

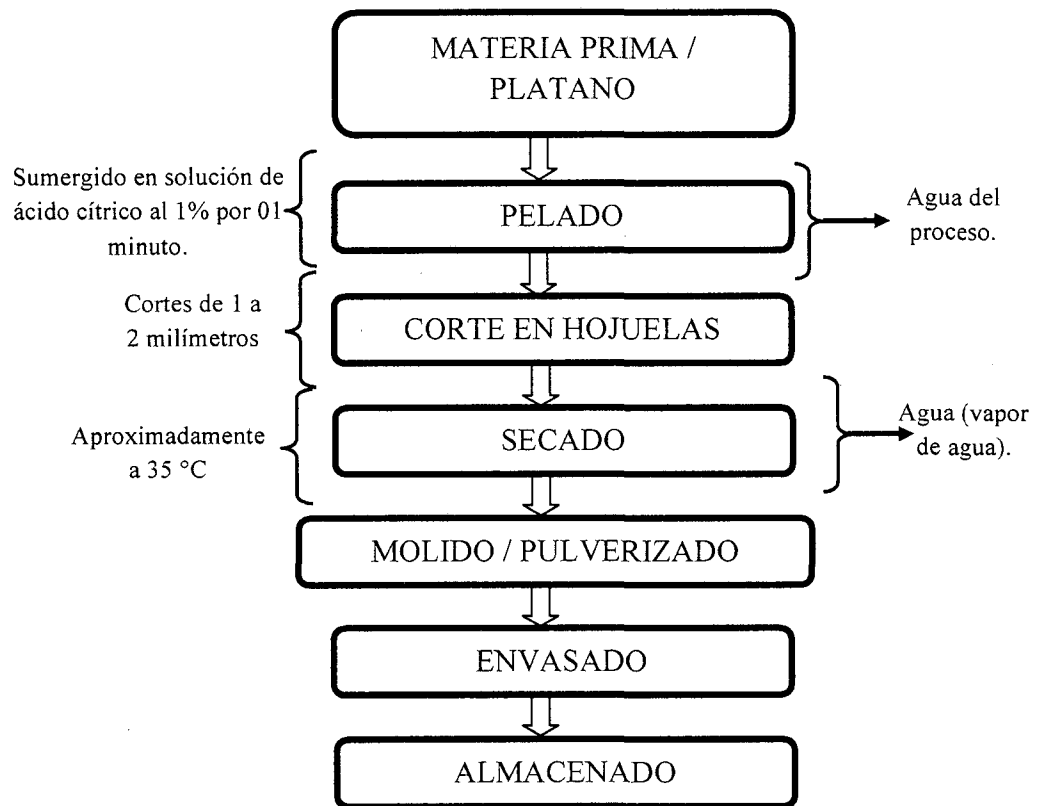
ANÁLISIS	NORMA
Humedad %	NTP 206.011
Proteína %	AOAC 935.39C
Lípidos %	NTP 206.017
Ceniza %	AOAC 935.39B
Fibra %	FAO 14/7
Carbohidratos %	Diferencia
Vitamina C mg/100	
Energía Kcal/100	Calculado

Fuente: Laboratorio de Análisis Químico de la UNSAAC (2012)

3.3.2. Acondicionamiento de la muestra

Para esta parte del trabajo de investigación, se realizó el secado de las hojuelas de plátano en un secador solar a unos 35°C aproximadamente, durante un día entero, se puede mostrar en la figura N° 06, el diagrama de operaciones que se realizó para el acondicionamiento de la muestra de harina de plátano, para lo cual se describe detalladamente todo el procedimiento que se realizó para tal fin.

Figura 06: Diagrama de operaciones para la obtención de la Harina de Plátano Verde (*Musa paradisiaca L.*).



Fuente: **Elaboración Propia (2012).**

Abajo se muestra la descripción detallada de los procedimientos que fueron realizados para obtener la harina de plátano que vendría a ser la muestra de estudio del presente trabajo.

❖ **Materia Prima.**

Los plátanos empleados para esta investigación fueron adquiridos de la Comunidad de Sudadero, a 27 Km de la Ciudad de Puerto Maldonado, Carretera Puerto Maldonado – Iberia.

❖ **Pelado.**

La operación de pelado se realizó manualmente, para luego sumergirlo en una solución de ácido cítrico al 1% por un minuto para evitar la oxidación. (Torrealba, 2007).

❖ **Corte en Hojuelas.**

Luego se procede a cubiletearlo en tajadas (hojuelas) de 1 a 2 milímetros de espesor para tener un buen secado uniforme y en el menor tiempo posible.

❖ **Secado.**

Luego se tiene que secar en bandejas a 35°C aproximadamente a temperatura ambiente, y si las condiciones climatológicas no son favorables para el secado, se cuenta con un pequeño horno artesanal que sirve para secar las hojuelas de plátano.

❖ **Molido.**

El molido y pulverizado de las hojuelas secas, se realiza en un molino de martillos con una capacidad de 450 Kg/hr., de acero inoxidable de la empresa INDAMAD S.A.

❖ **Envasado.**

El envasado se realiza manualmente, con los cuidados e higiene al respecto, se tienen dos presentaciones: bolsas de 250 grs. y 450 grs..

❖ **Almacenado.**

El almacenado de la harina de plátano se realiza en un almacén que se encuentra libre de humedad, seco y con la iluminación adecuada y sobre palets de 15 cm de altura.

3.3.3. Determinación de la isoterma de adsorción

La metodología consistió en dejar en equilibrio una masa conocida de muestra (en triplicado) con su atmósfera, en un recipiente cerrado herméticamente, el cual contiene un vaso con disolución saturada de sal de actividad de agua conocida (Tabla 04).

A partir de ese momento se controló el peso de la muestra según indica el método estático gravimétrico o método de control continuo de cambios de peso, descrito por **Jowitt *et al.* (1983)**, citado por **Gabas (1998)**; control que se llevaba a cabo diariamente hasta alcanzar un peso constante (condición de equilibrio).

Las humedades relativas fueron obtenidas con soluciones salinas saturadas que cubren un rango de actividad de agua (a_w) de 0.11 a 0.85, (Tabla 05) que pueden ser calculadas a partir de las ecuaciones de regresión, determinadas por **Labuza *et al.* (1985)**, citado por **Gálvez (2006)**.

Tabla 04: Sales y ecuaciones utilizadas para obtener la a_w a una temperatura (K) determinada.

SAL	Nomenclatura	Ecuación de regresión	r^2
Cloruro de Litio	LiCl	$\ln_{a_w} = (500.95 \times 1/T) - 3.85$	0.976
Acetato de Potasio	KC ₂ H ₃ O ₂	$\ln_{a_w} = (861.39 \times 1/T) - 4.33$	0.965
Cloruro de Magnesio	Mg Cl ₂	$\ln_{a_w} = (303.35 \times 1/T) - 2.13$	0.995
Carbonato de Potasio	K ₂ CO ₃	$\ln_{a_w} = (145.00 \times 1/T) - 1.30$	0.967
Nitrato de Magnesio	Mg (NO ₃) ₂	$\ln_{a_w} = (356.60 \times 1/T) - 1.82$	0.987
Cloruro de Sodio	NaCl	$\ln_{a_w} = (228.92 \times 1/T) - 1.04$	0.961
Cloruro de Potasio	KCl	$\ln_{a_w} = (367.58 \times 1/T) - 1.39$	0.967

Fuente: Labuza *et al.*, 1985, citado por Gálvez (2006).

Las isotermas de adsorción fueron determinadas a las temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C, para de esta manera conseguir las humedades de equilibrio de las muestras para cada una de las temperaturas.

Tabla 05: Variación de las humedades relativas de equilibrio (%) de las sales en función de las tres temperaturas experimentadas.

SAL	Nomenclatura	Humedad Relativa (%)		
		35°C	45°C	55°C
Cloruro de Litio	LiCl	10.81	10.27	9.79
Acetato de Potasio	KC ₂ H ₃ O ₂	21.55	19.74	18.18
Cloruro de Magnesio	Mg Cl ₂	31.80	30.83	29.95
Carbonato de Potasio	K ₂ CO ₃	43.63	42.99	42.39
Nitrato de Magnesio	Mg (NO ₃) ₂	51.54	49.70	48.03
Cloruro de Sodio	NaCl	74.29	72.58	71.01
Cloruro de Potasio	KCl	82.10	79.08	76.35

Fuente: Labuza *et al.*, 1985, citado por Gálvez (2006).

Se acondicionan 07 frascos de vidrio con tapa de cerradura hermética, en cada frasco se colocó una base que consistía en un pequeño pote de plástico, con una altura no mayor a la tercera parte del tamaño del frasco de vidrio, este pequeño pote servirá para que la solución saturada no estropee la muestra contenida en las tres placas petri.

Previo a todo esto lo mencionado, los frascos de vidrio y los potes de plástico fueron limpiados con una solución de formol al 40%, a fin de evitar una contaminación y/o el desarrollo de microorganismos perjudiciales para la muestra en estudio, produciéndose mohos propias que afectan a este tipo de productos; también las placa petri fueron limpiadas con alcohol etílico de 96° y finalmente esterilizadas a 120°C por 3 horas.

Las soluciones saturadas fueron preparadas de acuerdo a las cantidades de sal (g.) y agua (ml) recomendados por **Wolf et al. (1985)**, citado por **Díaz (2002)**, el cual se muestra en la tabla 06.

Tabla 06: Cantidad de agua y sal recomendados para la preparación de soluciones salinas saturadas.

Sal		Cantidad de preparación.	
		Sal (g)	Agua (ml)
Cloruro de Litio	LiCl	150	85
Acetato de Potasio	KC ₂ H ₃ O ₂	200	65
Cloruro de Magnesio	Mg Cl ₂	200	25
Carbonato de Potasio	K ₂ CO ₃	200	80
Nitrato de Magnesio	Mg (NO ₃) ₂	200	90
Cloruro de Sodio	NaCl	200	30
Cloruro de Potasio	KCl	200	60

Fuente: **Wolf et al. (1985)**, citado por **Díaz (2002)**

Seguidamente los potes de plástico que sirvieron de soporte de las placas petri con las muestras de harina. Se pesaron por triplicado muestras de cerca de 2 g. de harina de plátano en las placas petri, para luego ser introducidas en los frascos de vidrio, los cuales tienen que ser serrados herméticamente con la ayuda de unas abrazaderas y una cinta aislante marca 3M, y se colocaron en la incubadora (marca MEMMERT, modelo INB-400) a las temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C respectivamente.

Las muestras fueron pesadas cada 24 horas en una balanza analítica (marca AND, modelo HR-200. De precisión ± 0.0001 gr. hasta alcanzar un peso constante, momento en que se alcanza el equilibrio con su ambiente, que se considera cuando la diferencia entre dos

pesadas consecutivas fuese igual o inferior a 0.001 g. tal como lo recomienda **Gabas et al. (2009)**.

3.3.4. Determinación de la humedad de equilibrio (X_e)

La humedad de equilibrio fue determinada por la diferencia entre la masa de la muestra en equilibrio y su masa seca, tal como lo describe

$$X_e = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

X_e = Humedad de equilibrio (g. agua/gr m.s.).

m_{eq} = Masa de la muestra en el equilibrio (g.).

m_s = Masa de la muestra seca (g.).

La determinación de humedad de las muestras se realizó por el método de estufa a 105°C por 24 horas hasta un peso constante. Las placas son tapadas al momento de pesar para evitar la ganancia de humedad del medio ambiente. Los valores de humedad de equilibrio calculados fueron realizados para cada una de las placas petri, obteniéndose por último la media aritmética de las tres repeticiones para cada solución salina saturada.

3.3.5. Ajuste matemático de las isotermas de adsorción

Los datos experimentales se modelaron con las ecuaciones de: GAB (Guggenheim, Anderson y de Boer), BET (Brunauer, Emmett y Teller), Chung-Pfost, Oswin, Halsey, las que se presentan en (Ecuaciones 3, 4, 5, 6 y 7).

La evaluación de los parámetros de los modelos empleados se ha llevado a cabo mediante análisis de regresión no lineal de mínimos cuadrados empleando el programa informático MICROCAL ORIGIN versión 3.5. La calidad del ajuste de los modelos propuestos se evaluaron por medio del **coeficiente de correlación lineal (r^2)**, el que debe de ser superior a 0.85 para conseguir un buen modelado de los datos experimentales y por el

porcentaje de error medio relativo (%E) (Ecuación 8), parámetro ampliamente utilizado en isotermas de alimentos Toloba *et al.* 2004, citado por Gálvez 2006 y Chenlo *et al.* 2005.

3.3.6. Determinación de la monocapa del modelo de GAB

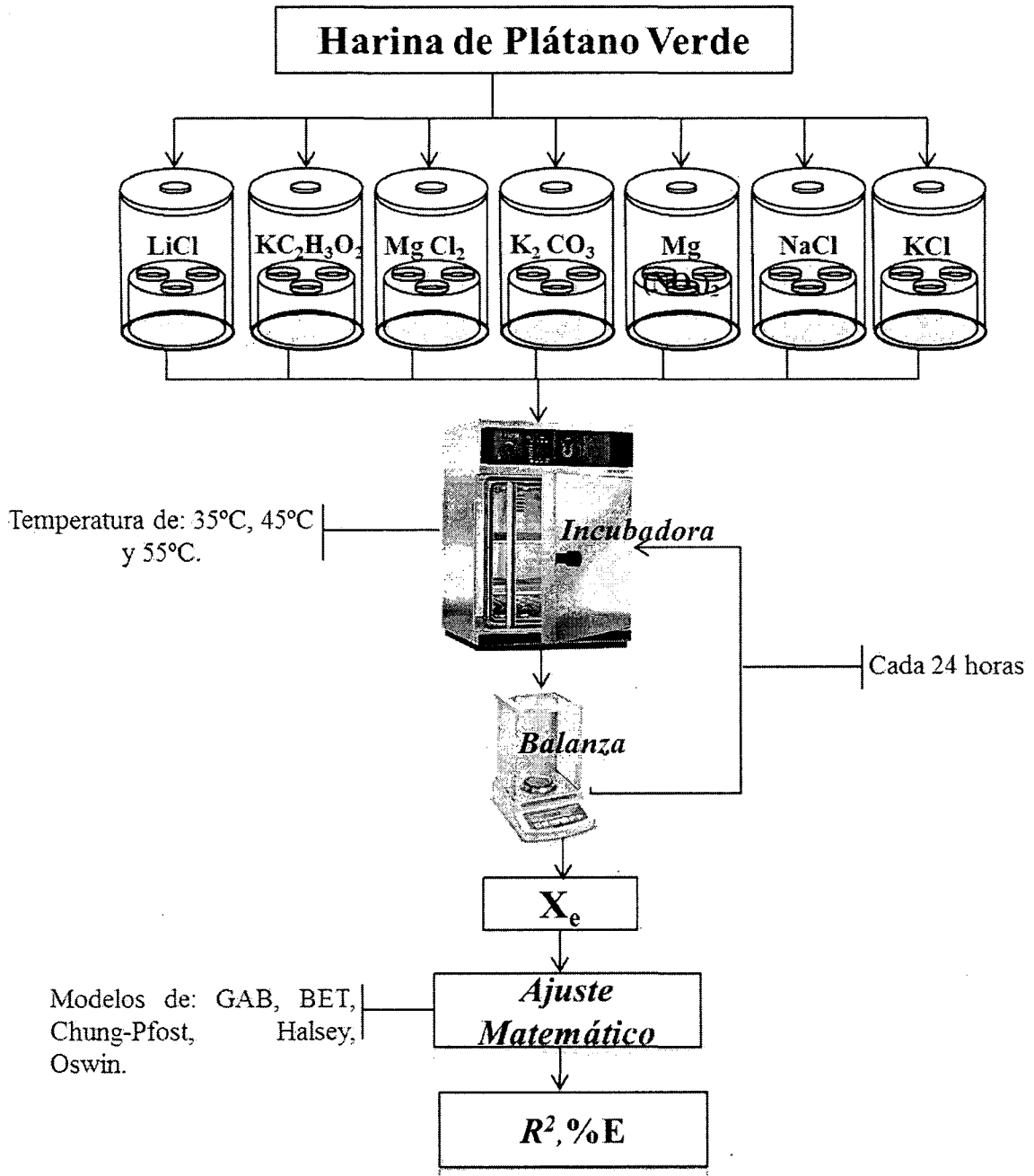
La monocapa X_m , se determinó una vez ajustada la isoterma de GAB (Ecuación 4), para las temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C, la determinación fue realizada a través de una regresión no lineal, utilizando el software MICROCAL ORIGIN versión 3.5.

3.3.7. Determinación del calor isostérico de adsorción (Q_{st})

A partir de las isotermas de adsorción construidas para la harina de plátano y ajustadas por el modelo de GAB, se determinó el calor isostérico de adsorción en función de la humedad de equilibrio (X_e) de la harina de plátano. La finalidad de este estudio fue analizar los parámetros energéticos en la adsorción de agua por la materia prima, el cual provee una información importante a cerca del mecanismo de adsorción e interacción entre los componentes del producto y el agua. El calor isotérico de adsorción (Q_{st}) fue calculado a través de la ecuación de Clausius-Clapeyron (Ecuación 9).

Para un intervalo de humedad de equilibrio (X_e) de 0.02 a 0.22 g agua/g m.s. fueron calculadas las actividades de agua (a_w), utilizando las ecuaciones de regresión de GAB. La regresión lineal del logaritmo natural de las actividades de agua, $\ln(a_w)$ versus el inverso de la temperatura en grados Kelvin, $1/T$, fue realizada a diferentes humedades (0.02 a 0.22 g agua/g m.s.), donde el valor del Q_{st} correspondió al coeficiente angular de cada recta, multiplicada por la constante universal de los gases R (8.314 KJ Kmol⁻¹ K⁻¹). En seguida los datos del Q_{st} y las diferentes X_e fueron ajustados a la ecuación exponencial de Tsami *et al.* (1990) (Ecuación 11), con ayuda del software MICROCAL ORIGIN versión 3.5, calculándose los parámetros Q_0 y X_0 para la harina de plátano.

Figura N° 07: Diagrama de flujo para la determinación de las isotermas de adsorción de la harina de plátano verde.



Fuente: Elaboración propia (2011).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA HARINA DE PLÁTANO (*Musa paradisiaca L.*)

Composición proximal: Los resultados del análisis químico proximal de la muestra de harina de plátano (*Musa Paradisiaca L.*), se presentan en la tabla 7.

Tabla 07: **Composición proximal de la muestra de harina de plátano (*Musa paradisiaca L.*)**

COMPONENTES	VALOR
Humedad %	9.40
Proteína %	2.66
Lípidos %	0.36
Ceniza %	1.64
Fibra %	1.71
Carbohidratos %	85.94
Vitamina C mg/100	3.29
Energía Kcal/100	350.78

Fuente: Datos obtenidos de análisis químico proximal realizado en laboratorios de la UNSAAC-Cusco-2012.

Los valores del análisis químico proximal obtenidos para harina de plátano presentan valores similares a los presentados por **Viccina (2006)** para el mismo producto de harina de plátano (humedad 6.9%, proteína 3,6%, lípidos 0,18%, ceniza 2.3%, fibra 9,1%, carbohidratos 82%), donde variaciones en la composición pueden deberse a que las frutas tiene mucha dependencia del grado de madurez, la variedad y los tratamientos a los que fue sometida la fruta.

4.2 HUMEDAD DE EQUILIBRIO

La humedad inicial de la muestra de harina de plátano verde fue de 0.130 g agua/g m.s. , mientras que los datos experimentales de humedad de equilibrio (X_e), en función a la actividad de agua (a_w) a las temperaturas de estudio de 35°C, 45°C y 55°C, se muestran en la tabla 8. El tiempo requerido para alcanzar la humedad de equilibrio (X_e) en las muestras de

harina de plátano fue de 22, 18 y 10 días para las temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C respectivamente.

Tabla 08: Valores de humedad de equilibrio, X_e (g agua/g m.s.) experimental de las muestras secas de harina de plátano verde en función de la actividad de agua (a_w) a las temperaturas de estudio.

Solución Salina Saturada	Temperatura					
	35°C		45°C		55°C	
	a_w	X_e (b.s.) ^a	a_w	X_e (b.s.) ^a	a_w	X_e (b.s.) ^a
LiCl	0.1081	0.0433	0.1027	0.0349	0.0979	0.0220
KC ₂ H ₃ O ₂	0.2155	0.0663	0.1974	0.0510	0.1818	0.0389
MgCl ₂	0.3180	0.0882	0.3083	0.0732	0.2995	0.0549
K ₂ CO ₃	0.4363	0.1109	0.4299	0.0902	0.4239	0.0707
MgNO ₃	0.5154	0.1241	0.4970	0.1028	0.4803	0.0757
NaCl	0.7430	0.1645	0.7258	0.1313	0.7101	0.1075
KCl	0.8211	0.2214	0.7908	0.1394	0.7635	0.1011

a: promedio de las tres réplicas.

Fuente: **Elaboración propia (2012).**

En la tabla 08 se observa cómo la humedad de equilibrio aumenta con la elevación de la actividad de agua (a_w), demostrando la higroscopicidad de las muestras, así mismo se puede apreciar que la humedad de equilibrio disminuye con el incremento de la temperatura de 35°C a 55°C, siguiendo la misma tendencia de la mayoría de los productos agrícolas (Saravacos *et al.*, 1986; Tsami *et al.*, 1990; Ferreira y Pena, 2003; Kurozawa *et al.*, 2005; Telis – Romero *et al.*, 2005; Resende *et al.*, 2006; Nascimento, 2006; Duarte, 2008; Oliveira *et al.*, 2009; Marques, 2009; Alakali *et al.*, 2009), citados por Pulla (2011).

Según Rizvi (2005), citado por Leal (2010) y Pulla (2011), la disminución de del contenido de humedad de equilibrio con el incremento de la temperatura en los procesos de sorción, está relacionado a los cambios energéticos del sistema, indicando que el aumento de la temperatura, torna termodinámicamente menos estable las moléculas de agua, es decir,

aumenta el grado de desorden molecular del agua sorbida en la superficie del sólido, llegando a mayores niveles de energía, favoreciendo de esa manera la ruptura de la ligación intermolecular entre el agua y los sitios de sorción, reduciendo el contenido de agua del producto. A medida que la temperatura varía, la excitación de las moléculas, así como la distancia y por consiguiente, la atracción entre las moléculas, también varía. Eso hace que la cantidad de agua sorbida cambie a medida que ocurre una variación en la temperatura a una determinada humedad relativa.

4.3 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Los valores experimentales de humedades de equilibrio, actividad de agua y las curvas ajustadas con la ecuación GAB se muestran en la Figura 8, en la figura también puede mostrarse el comportamiento del tipo II, conocida como sigmoidea, de acuerdo a la clasificación de Isotermas de Van der Waals para temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C. Este comportamiento de este tipo de isotermas es típico de alimentos con alto contenido de carbohidratos (Shafuiur, 2003 citado por Choque, 2009).

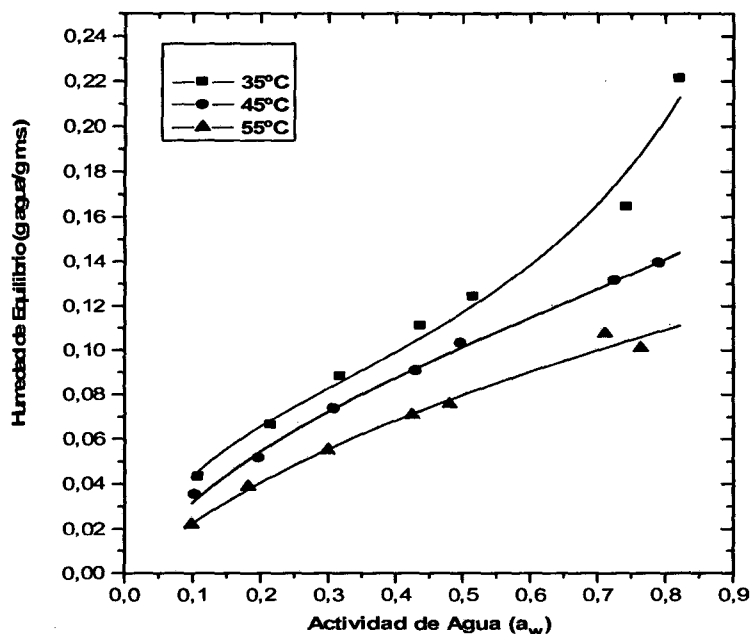



Figura08: Isotermas de adsorción experimental de harina de plátano a temperaturas de 35°C,45°C y 55°C.

Johnson y Brennan (2000) muestran similares resultados para plátano (*Musa paradisiaca*); así como **Samapundo et al., (2007)**; **Oleyade et al., (2008)** para semilla de Taro; **Garcia-Perez et al., (2008)**.

En una actividad de agua constante, un desplazamiento hacia arriba de temperatura desde 35 a 55°C, condujo a un cambio de las isothermas hacia un valor inferior de la humedad de equilibrio (X_e). La razón es que a medida que se incrementó la temperatura, la presión de vapor de agua de la humedad de la muestra de harina de plátano aumentó y aceleró la transferencia de humedad desde la muestra de harina de plátano al aire circundante. **Kapsalis (1981)** indicó que la temperatura afecta a la movilidad de las moléculas de agua y el equilibrio dinámico entre el vapor de agua y las fases adsorbidas. Similar hallazgo se observó también para varios productos de almidón de alimentos (**Barreiro et al, 2003**; **Iglesias y Chirife, 1982**; **Rohvein et al, 2004**).

4.4 MODELADO MATEMATICO DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCION PARA HARINA DE PLATANO (*Musa paradisiaca L.*)

Para modelar el comportamiento de las isothermas de adsorción se emplearon 5 modelos matemáticos de isothermas más empleadas en alimentos; además se empleó el software Microcal Origin 3.5. Los valores de las constantes fueron obtenidas mediante regresión no lineal de los datos experimentales a estos modelos con su respectivo Coeficiente de Determinación (R^2), dichos resultados se muestran en la tabla 09.

Tabla 09: **Parámetros de ajuste de las isothermas de adsorción de harina de plátano (*Musa paradisiaca L.*) para los diferentes modelos matemáticos con sus respectivos coeficientes de determinación (R^2), el Porcentaje de error medio relativo (% ) las tres temperaturas (35°C, 45°C, 55°C).**

Modelo	T (°C)	Parámetros					R^2	% E
		X_m	C	K	A	B		
GAB	35	0.1351	11.5281	0.7715	-	-	0.9826	4.7533
	45	0.1215	7.9565	0.0830	-	-	0.9979	2.3491
	55	0.0819	7.9162	0.2402	-	-	0.9876	2.7656
Chung-Pfost	35	-	2.4679	-	-165.94114	0.4987	0.9842	6.0187
	45	-	2.9304	-	-166.45493	0.5001	0.9640	9.5694
	55	-	2.7350	-	-166.36478	0.4998	0.9438	12.7340
Halsey	35	-	1.83197	-	81.5439	0.2581	0.97136	10.5274
	45	-	2.1235	-	81.66424	0.26176	0.92179	14.3953
	55	-	1.94583	-	81.63731	0.26186	0.8976	18.3597
Oswin	35	-	9.6795	-	1386.51643	14.4806	0.9809	18.5203
	45	-	260.9618	-	3148.24486	21.3873	0.9811	6.1629
	55	-	294.3373	-	2973.49431	25.8564	0.9661	8.1433
BET ⁽¹⁾	35	0.0669	12.7698	-	-	-	0.9877	19.5284
	45	0.0575	11.0582	-	-	-	0.9925	22.8420
	55	0.0459	8.9762	-	-	-	0.9837	22.2940

Fuente: **Elaboración propia.**

En la tabla 09 se presentó un resumen de los resultados obtenidos para los modelos propuestos, con sus respectivas constantes, además de los valores de R^2 y del %E. En general, todas las ecuaciones propuestas presentaron un buen ajuste de los datos experimentales, dando coeficientes de correlación (R^2) superiores 0.92 y un % E en promedio para las tres temperaturas en el caso del modelo de GAB inferior al 5%, pero en casi en el resto de los modelos son superiores al 10%. El modelo de GAB ha sido ampliamente utilizado en muchos alimentos y cereales en polvo. Como se muestra en la tabla 8, los valores obtenidos para la humedad de la monocapa de la ecuación de GAB ($X_m = 0.1351 - 0.0819$ g agua/g m.s.) son

(1) Para el caso de las constantes en la Ecuación de BET se tomó sólo los datos que corresponden a las actividades de agua de hasta 0.5.

mayores con respecto a los obtenidos con la ecuación de BET ($X_m = 0.0459 - 0.0669$ g agua/g m.s.); Resultados similares obtuvieron Sopade & Ajiserigi (1994) y Timmermann *et al.* (2001). Para granos y afrecho de maíz, respectivamente, reportando que la humedad de la monocapa para los modelos GAB y BET no son similares. Por otra parte, en la misma tabla se muestra la tendencia a disminuir del contenido de humedad de la monocapa (X_m) al aumentar la temperatura, lo que puede deberse a la menor disponibilidad de los sitios activos (o enlaces de hidrógeno) en los polímeros de almidón para la unión con el agua Westgate *et al* (1992), como resultado de los cambios físicos y químicos inducidos por la temperatura.

En las Figuras 9, 10, 11, 12 y 13, están representadas las isotermas de adsorción para harina de plátano sometida a temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C, para diferentes contenidos de humedad de equilibrio y actividades de agua de entre 0.0979 a 0.8210, las mismas que fueron ajustadas a los modelos matemáticos de Chung – Pfof (1,967); Halsey(1,947); Oswin (1946) BET (1,938) y GAB (Anderson, 1946; De Boer, 1953; Guggenheim, 1966). (Iguaz y Vírseda, 2006) (Sandoval *et al.*,2002).

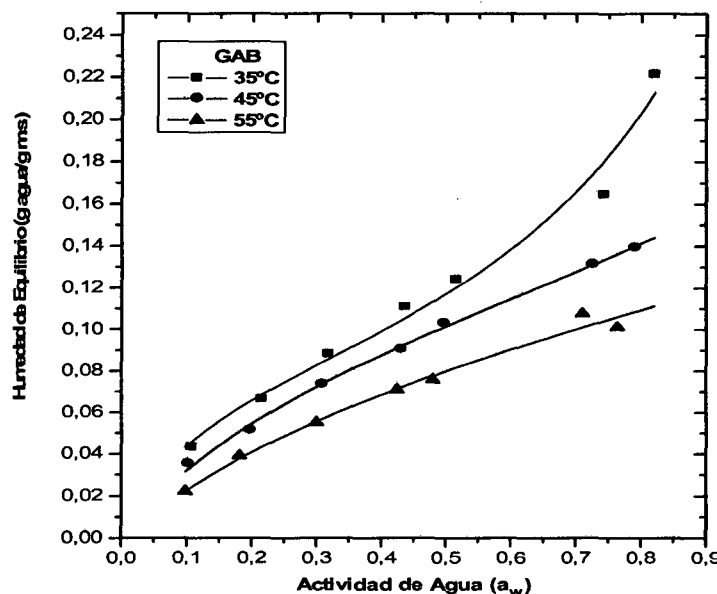


Figura 09: Isoterma de adsorción experimental de harina de plátano ajustadas al modelo de GAB a temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C. Fuente: Elaboración propia (2012).

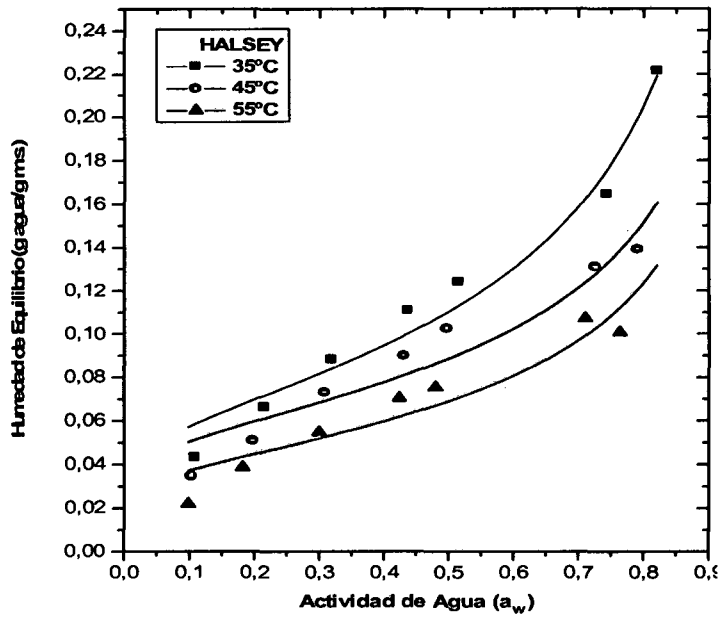


Figura10: Isotermas de adsorción experimental de harina de plátano ajustadas al modelo Halsey a temperaturas de 35°C,45°C y 55°C.
Fuente: Elaboración propia (2012).

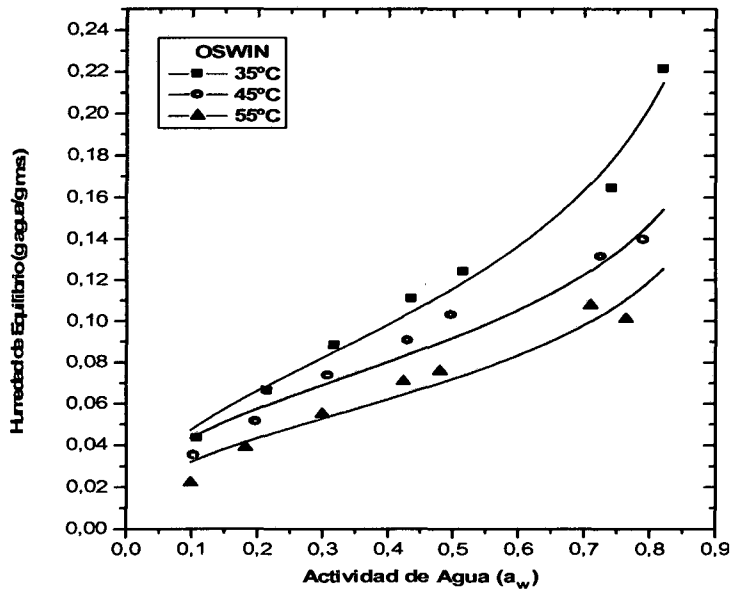


Figura 11: Isotermas de adsorción experimental de harina de plátano ajustadas al modelo Oswin a temperaturas de 35°C,45°C y 55°C.
Fuente: Elaboración propia (2012).

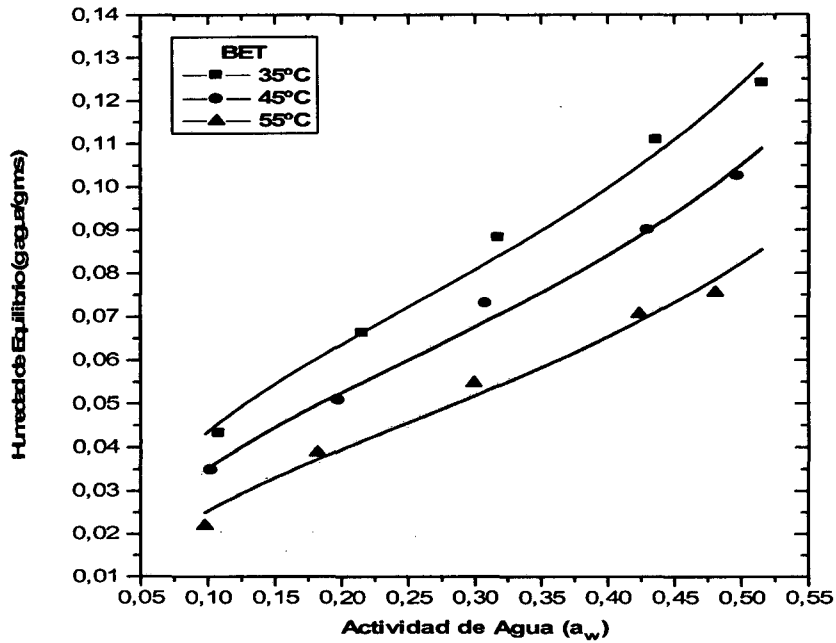


Figura 12: Isotermas de adsorción experimental de harina de plátano ajustadas al modelo BET a temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C.
Fuente: Elaboración propia (2012).

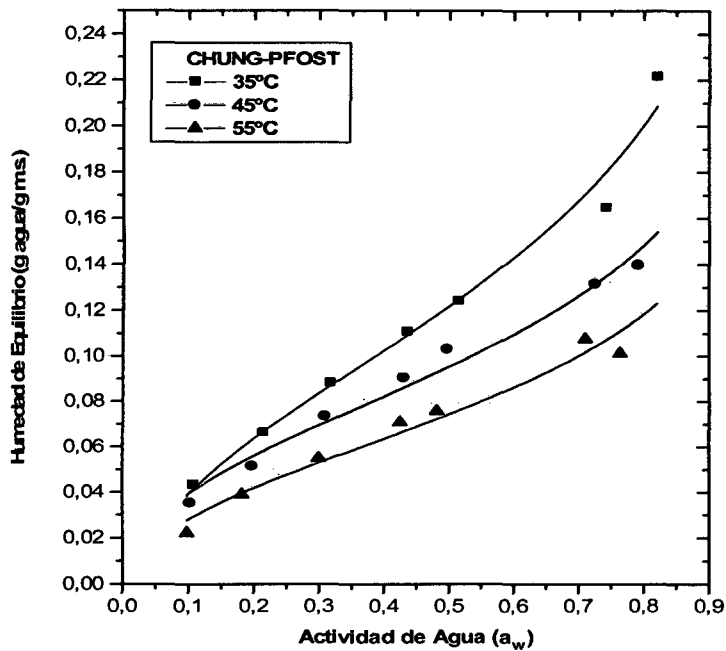


Figura 13: Isotermas de adsorción experimental de harina de plátano ajustadas al modelo Chung-Pfost a temperaturas de 35°C, 45°C y 55°C.
Fuente: Elaboración propia (2012).

El valor de la humedad de la monocapa (X_m) calculado por los modelos de GAB y BET (Tabla 09) es de particular importancia, ya que indica la cantidad de agua que está fuertemente adsorbida a los sitios específicos en la superficie del alimento, y es considerado como el valor óptimo para asegurar su estabilidad (Fennema, 1996, citado por Valeriano, 2009). Los valores de X_m obtenidos para la harina de plátano varían de 0.1351 a 0.0819 g agua/g m.s. de acuerdo con el modelo de GAB y de 0.0669 a 0.0459 g agua/g m.s. de acuerdo con el modelo de BET, observándose claramente que los valores de X_m del modelo de GAB son mayores con respecto a los obtenidos por el modelo de BET; resultados similares obtuvieron Vega *et al.* (2006), Valeriano (2009), Oliveira *et al.* (2009) y Ccalli (2003), para harina de maíz (*Zea mays* L.), jugo de huasai (*Euterpe oleraceae* Mart) atomizado, microalgas (*Spirulina platensis*) e higo seco (*Ficus carica* L.) respectivamente. Timmermann *et al.* (2001) cita en su estudio comparativo entre los dos modelos, que la X_m de los modelos de GAB y BET no son similares, siendo en la gran mayoría de veces los resultados obtenidos por GAB mayores a aquellos calculados por BET, de la misma forma como fue encontrado para la harina de plátano en este trabajo.

Por otra parte, conforme se muestra en la tabla 8, se puede observar una tendencia a la disminución de la X_m al aumentar la temperatura de 35°C a 55°C, este hecho también fue observado por Saravacos *et al.* (1986) para uva pasa, Moreira (1999) para jengibre (*Zinziber ofcinale*) seco. De acuerdo con Iglesias y Chirife (1976), citado por Nascimento (2006), el comportamiento de disminución de la X_m con el aumento de la temperatura, puede ser atribuido al comportamiento de los carbohidratos presentes en la harina de plátano y a la reducción del número de sitios activos para la unión con el agua, como resultado de los cambios físicos y químicos inducidos por la temperatura.

Conforme a lo mencionado anteriormente podemos afirmar que la X_m muestra dependencia con la temperatura, es así que al realizar un análisis de los valores de la X_m a través de una regresión lineal, se presenta la siguiente ecuación con un R^2 de 0.9263.

$$X_m = - 0.0027T + 0.2325$$

La constante C_{GAB} es función de la interacción entre los sitios activos del alimento y las moléculas de agua de la atmósfera (Choque, 2009). Los valores de C_{GAB} presentados en este trabajo muestran una clara relación con el efecto de la temperatura, pues al aumentar la temperatura, la constante C_{GAB} disminuye en su valor, variando de 11.5281 para una temperatura de 35°C, 7.9565 a 45°C y 7.9162 para 55°C. Iglesias y Chirife (1982), citado por Martinelli (2008), estudiaron más de 30 diferentes productos alimenticios y observaron que en 74% de ellos el valor de C_{GAB} no disminuyó con el incremento de la temperatura, probablemente debido a los cambios irreversibles asociados con el incremento de la temperatura como reacciones enzimáticas y desnaturalización de proteínas.

El valor de K_{GAB} proporciona una medida de las interacciones entre las moléculas de agua de la multicapa con el absorbente, y su valor tiende a estar entre el de la energía de las moléculas en la monocapa y el del agua líquida. Si K_{GAB} es igual a 1, las multicapas tienen propiedades de agua líquida y el comportamiento de sorción puede ser modelado por la ecuación de BET (Gabas *et al.*, 2007). Los valores de K_{GAB} de la harina de plátano verde muestran una disminución de sus valores con el incremento de la temperatura en un rango de 0.7715 a 0.2402; un comportamiento similar fue observado por Alakali *et al.* (2009) al estudiar las isotermas de adsorción del jengibre (*Zinziber ofcinale*) seco, Nascimento (2006) para pulpa de pitanga (*Eugenia uniflora* L.) atomizada y Kohayakawa (2004) para pulpa seca de mango (*mangifera indica*).

4.5. CALOR ISOSTÉRICO DE ADSORCIÓN

Para determinar el calor isostérico de adsorción (q_{st}) de la harina de plátano, se consideraron los valores de X_e predeterminados a las diferentes temperaturas de evaluación mediante el modelo de GAB, ya que presentó el mejor ajuste de los datos experimentales, así mismo los valores de a_w fueron calculados a partir de este modelo.

La tabla 10 muestra los valores del calor isostérico de adsorción experimental y calculado mediante las ecuaciones de Clausius-Clapeyron (Ecuación 9) y Tsami *et al* (Ecuación 11) respectivamente.

Tabla 10: Calor isostérico de adsorción (q_{st}) de la harina de plátano verde a diferentes valores de humedad de equilibrio.

X_e (b.s.)	q_{st} (exp.) ^a (kJ/mol K)	q_{st} (cal.) ^b (kJ/mol K)
0.0375	28.3053	30.2248
0.05	31.3389	28.6680
0.0625	28.2666	27.1913
0.075	25.0500	25.7907
0.0876	22.6152	24.4518
0.1	22.9892	23.2021
0.1125	22.9685	22.0070

a) Calor isostérico de adsorción experimental, obtenido por la ecuación 9.

b) Calor isostérico de adsorción calculado, obtenido por la ecuación 11.

Fuente: **Elaboración propia (2012).**

La figura 14 presenta datos de actividad de agua (a_w) en función de la temperatura, para cada humedad de equilibrio (X_e) en la forma de isósteras. Notándose en esta figura, la influencia de la temperatura en las curvas, es decir, para bajos contenidos de humedad, la a_w aumentó con el incremento de la temperatura. Similares tendencias para las isósteras fueron obtenidos por Tsami *et al.* (1990) para uva pasa y ciruelas secas, Kohayakawa (2004) para pulpa seca de mango (*Mangifera indica*), Alakali *et al.* (2009) para jengibre (*Zinziber ofcinale*) seco y Ccalli (2003) para higo (*ficus carica* L.) seco.

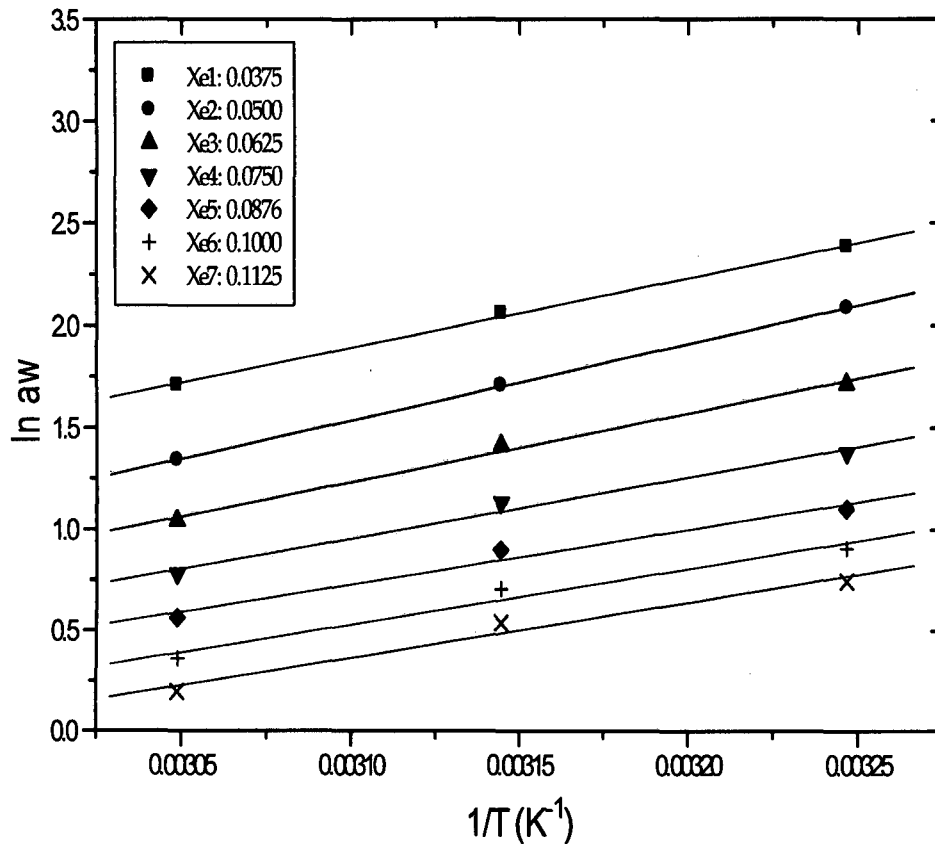


Figura 14: Curvas de $\ln(a_w)$ versus $1/T$ a diferentes humedades de equilibrio para la harina de plátano verde.

Fuente: Elaboración propia (2012).

En la figura 15 son presentados los valores del calor isostérico de adsorción (q_{st}) en función del contenido de humedad de equilibrio (X_e), estimados mediante la ecuación 09. En dicha figura se aprecia que el q_{st} crece desde 28.3053 hasta 31.3389 kJ/mol K, para luego observar un decrecimiento hasta 22.6152 kJ/mol K, con el aumento de la X_e de 0.05 a 0.0876 g agua/g m.s. (tabla 10).

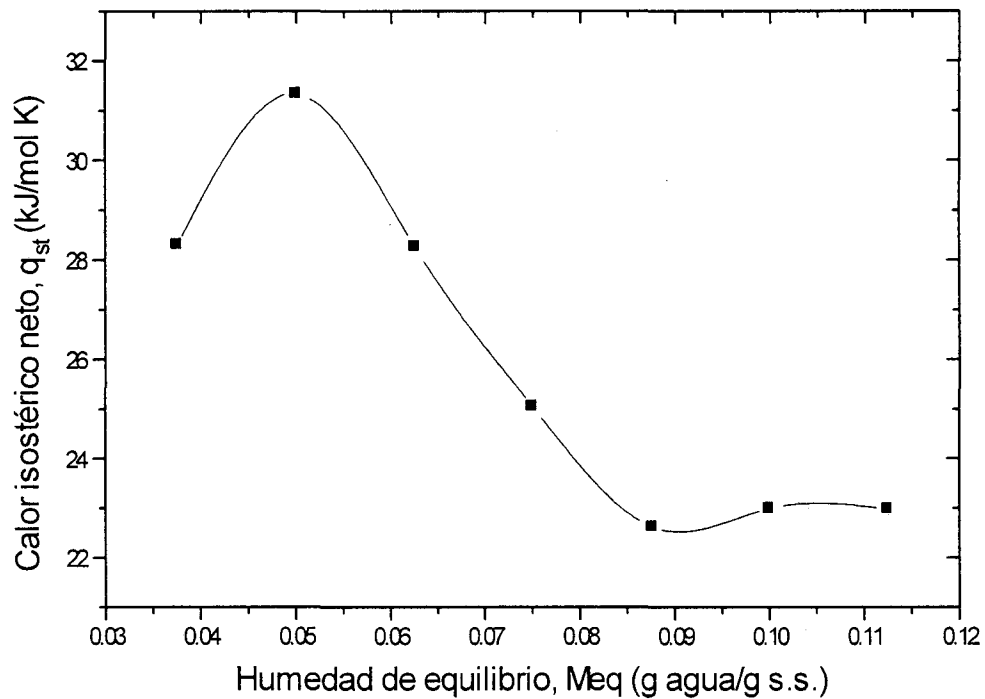


Figura 15: Influencia de la humedad de equilibrio (X_e) en el calor de adsorción (q_{st}) para la harina de plátano verde.

Fuente: Elaboración propia (2012).

Tsami *et al.* (1990), evaluaron los calores isostéricos de adsorción en varias frutas secas (uva, higo, ciruelo y albaricoque) y estos decrecen de 20 kJ/mol K hasta valores cercanos a cero cuando el contenido de humedad se incrementó de 0.05 a 0.50 g agua/g m.s. Alakali *et al.* (2009), al estudiar las isothermas de adsorción en el jengibre (*Zinziber ofcinale*) seco observó que los q_{st} decrecieron de 10.113 a 0.851 kJ/mol K con un incremento de la humedad de 0.10 a 0.22 g agua/g m.s.

Este comportamiento puede ser explicado considerándose que inicialmente la sorción ocurre en los sitios disponibles más activos, dando origen a una alta energía de interacción. A medida que la mayoría de estos sitios llegan a ser ocupados, la sorción ocurre en menores sitios disponibles, dando origen a bajos calores de sorción (gabás, 1998). Tsami *et al.* (1990)

indica que los altos calores de sorción de agua (q_{st}) a bajos contenidos de humedad son una indicación de la fuerte interacción entre los componentes agua-alimento en las frutas secas.

Los datos experimentales del q_{st} para la harina de plátano verde en función de la X_e fueron ajustados a través de la ecuación exponencial de Tsami *et al* (1990), el cual presenta los parámetros q_0 y X_0 . El resultado de este ajuste están descritos en la Figura 16 y en la Tabla 10.

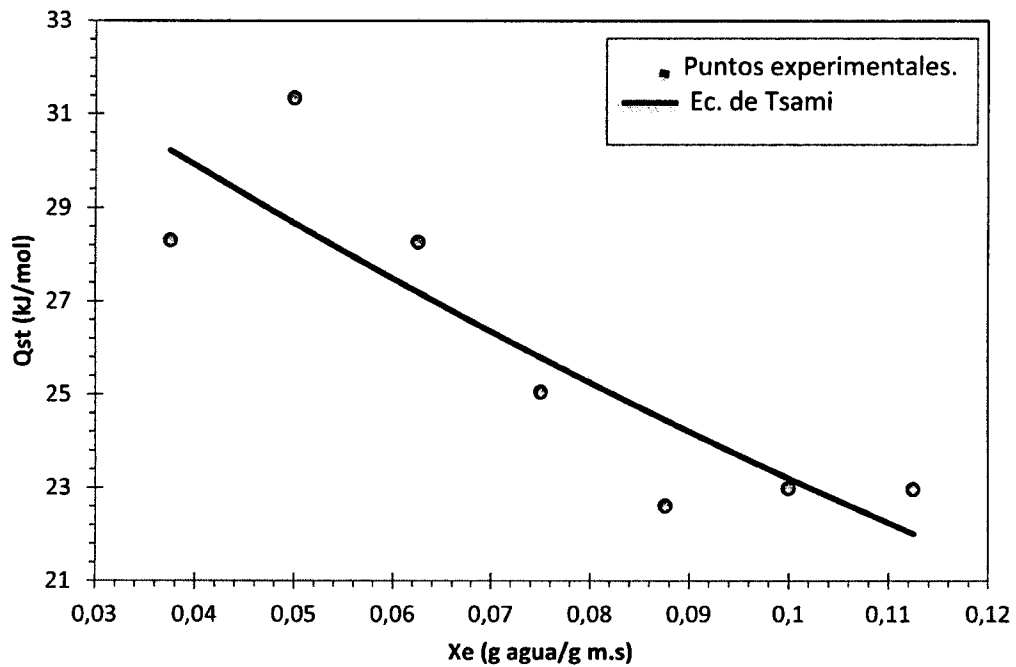


Figura16: Influencia de la humedad de equilibrio (X_e) en el calor de adsorción (q_{st}) para la harina de plátano verde, según la ecuación de Tsami *et al.* (1990).

Fuente: Elaboración propia (2012).

Tabla 11: Parámetros q_0 y X_0 y el coeficiente de determinación (R^2) ajustados de la ecuación de Tsami *et al.* (1990)

Muestra	Parámetros ^a		R^2
	q_0	X_0	
Harina de Plátano	35.4214	0.2364	0.7575

a: Parámetros obtenidos a un nivel de significancia del 5%.

Fuente: **Elaboración propia (2012).**

El ajuste de la ecuación exponencial de Tsami *et al.* (1990) Presentó un coeficiente de determinación de 0.7575, con base a este valor, se puede decir que el modelo no es el adecuado para este producto, lo que no sucede con la ecuación de Clausius-Clapeyron que sí se ajusta con los datos experimentales tal como se muestra en la Figura 15 que predice con precisión los valores del q_{st} de la harina de plátano verde en función de la X_e .

V. CONCLUSIONES

- 5.1. Las isotermas de adsorción de la harina de plátano exhibieron un comportamiento del tipo II para todas las temperaturas de estudio, similar a otros productos alimenticios.
- 5.2. La humedad de equilibrio de la harina de plátano es directamente proporcional a la actividad de agua a_w (humedad relativa) y directamente proporcional al incremento de la temperatura para un mismo valor de actividad de agua, a_w (humedad relativa), siguiendo la misma tendencia de la mayoría de los productos agrícolas.
- 5.3. De acuerdo a los parámetros estadísticos, los mejores modelos que se ajustaron a los datos experimentales de las isotermas de adsorción de la harina de plátano fueron los de GAB (Guggenheim, Anderson y De Boer) y Chung – Pfof, con valores de R^2 mayores a 97%, porcentaje de error medio relativo (%E) menor del 5%.
- 5.4. Las condiciones de almacenamiento, para asegurar la mayor estabilidad de la harina de plátano es, una humedad del producto de hasta 13.5% en b.s.
- 5.5. El valor de humedad de la monocapa (X_m) del modelo de GAB presenta dependencia lineal negativa con la temperatura, disminuyendo de 0.1351 a 0.0819 g agua/g m.s. para el rango de temperatura de 35°C a 55°C. Así mismo, el parámetro K_{GAB} , muestra una dependencia lineal negativa con el incremento de la temperatura, disminuyendo de 0.7715 a 0.2402 en el mismo intervalo de temperatura. Por otra parte el valor de C_{GAB} es mayor que la unidad, indicando que la harina de plátano verde presenta alta capacidad de adsorción, por lo que es un producto que puede deteriorarse y ser fácilmente atacado por microorganismos si se almacena a humedades relativas mayores a 50%.

5.6. El calor isostérico de adsorción (q_{st}) disminuye con el aumento del contenido de humedad en la harina de plátano verde, disminuyendo de 31.3389 a 22.9685 kJ/mol K para humedades de 0.0375 g agua/g m.s. a 0.1125 g agua/g m.s. respectivamente, en el rango de temperaturas estudiadas. Así mismo para el cálculo del q_{st} en función del contenido de humedad del producto, se comprobó que la ecuación de **Tsami *et al.* (1990)**, no se ajusta a los datos experimentales, cosa que no sucede con la ecuación de Clausius-Clapeyron, con la cual los datos experimentales coinciden con esta última ecuación.

VI. RECOMENDACIONES

- 6.1. Llevar a cabo un estudio para determinar la vida útil de la harina de plátano verde (*Musa paradisiaca* L.) durante su almacenamiento a las condiciones sugeridas en este trabajo y de esta manera determinar el tipo de envase a utilizar.
- 6.2. Realizar un estudio en la determinación de las isothermas de desorción de la harina de plátano verde (*Musa paradisiaca* L.) a las temperaturas de 45°C, 55°C y 60°C, con la finalidad de encontrar los parámetros adecuados para el secado de este producto (humedad final del producto y la energía requerida para su secado).
- 6.3. Probar si el tamaño de la partícula influye en la isoterma de adsorción.
- 6.4. Realizar el ajuste de los datos experimentales de las isothermas a otros modelos matemáticos existentes.
- 6.5. Evaluar el efecto de los tipos de secado (secado solar: directo e indirecto, secado convencional con flujo de aire caliente), en las isothermas de adsorción del plátano verde y en la calidad microbiológica del producto.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Adamson, A. W. (1997). **Physical chemistry of surfaces**. Wiley-Interscience. New York
2. Agricultura Orgánica en el Trópico y Subtrópico (2001). **Banano**. Guías de 18 cultivos - Asociación Naturland 2ª edición.
3. Alakali, J., Irtwange, S. V. and Satimehin, A. (2009). **Moisture adsorption characteristics of ginger slices**. *Ciência y Tecnología de Alimentos*, Campinas, 29(1): 155 - 164. Campinas, São Paulo - Brasil.
4. Arias, P., Dankers, C., Liu, P., Pilkauskas, P. (2004). **La Economía Mundial del Banano 1985 - 2002**. Dirección de Productos Básicos y Comercio. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma - Italia.
5. Bello - Pérez. L. A.; Contreras, R. S. M.; Romero, M. R.; Solorza, F. J.; Jimenez, A. A. (2002). **Propiedades químicas y funcionales del almidón modificado de plátano *Musa paradisiaca* L. (Var. Macho)**. *Agrociencia*, vol. 36, núm. 2, pp. 169-180, Colegio de Postgraduados - México
6. Biliaderis, C. G. (1991). **The structure and interactions of starch with food constituents**. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology* 69: 60-78.
7. Brunauer, S., Emmett, P. H., Teller, E., (1938). **Adsorption of gases in multimolecular layers**. *Journal of the American Chemical Society* 60 (2), 309 – 319.
8. Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). **Adsorption of gases in multimolecular layers**. *Journal of the American Chemists' Society*, 60, 309–319.
9. Ccalli, H. (2003). **Secagem de figo (*Ficus carica* L.) da variedade "Gigante de Valinhos" em secador de bandejas**. Tese de Mestrado em Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.
10. Chávez, M. M; Hermanadas, M.; Roldan, J.A. (1992). **Tablas de uso práctico del valor nutritivo de los alimentos de mayor consumo en México**. Comisión Nacional de Alimentos Del Instituto Nacional de Nutrición.
11. Cheesman, (1948). **Classification of the Bananas. III. Critical Notes on Species. c. *Musa paradisiaca* L. and *Musa sapientum* L.** *Kew Bulletin* 2 (3). pp. 145–153.
12. Cheftel, J. y Cheftel, H. (1976). **Introducción a la bioquímica y tecnología de alimentos, Volumen I**. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza - España.

13. Chen, J., and J. Jane. (1994a). **Preparation of granular cold-water-soluble starches prepared by alcoholic alkaline treatment.** *Cereal Chemistry* 71: 618-622.
14. Choque, D. (2009). **Evaluación de las isoterms de adsorción del Maíz Morado (*Zea mays L.*) - variedad Canteño.** Tesis de maestría para optar el grado de Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco - Perú.
15. Chung, D. S., & Pfost, H. B. (1967). **Adsorption and desorption of water vapour by cereal grains and their products. Part II: Development of the general isotherm equation.** *Transactions of the ASAE*, 10, 549 - 557.
16. Comaposada, J.; Gou, P.; Arnau, J. (2000). **The effect of sodium chloride content and temperature on pork meat isotherms.** *Meat Science*, v. 55, n. 3, p. 291-295.
17. Correa, P., C.; Duarte, G., A., L.; Resende, O.; Meneses, R., D. (2005). **OBTENÇÃO E MODELAGEM DAS ISOTERMAS DE DESSORÇÃO E DO CALOR ISOSTÉRICO DE DESSORÇÃO PARA GRÃOS DE TRIGO** *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.7, n.1, p.39-48.
18. Díaz, J. (2002). **Deshidratación por aire caliente de músculo de camarón gigante de malasia (*Macrobrachium rosenbergii*)** Tesis de Ingeniero Agroindustrial. Facultad de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Nacional de San Martín , Tarapoto - Perú.
19. Duarte, A. L. (2008). **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*ricinus communis*L.) durante a secagem e o armazenamento.** Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais - Brasil.
20. Espino, R., C. (1995). **Evaluación de los Modelos de G.A.B., B.E.T., Pfost et al. Y Henderson - Thompson en la Descripción de Isoterms de Adsorción en Sémola de Maíz y Maíz Opaco - 2 (*Zea mays*).** Tesis de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Facultad de Industrias Alimentarias. Universidad Nacional Agraria La Molina.
21. Fennema, O., R. (1993). **Análisis de Alimentos. Fundamentos y Técnicas.** Editorial Reverté - España.
22. Ferreira, C. D. y Pena, R. S. (2003). **Comportamento higroscópico da farinha de pupunha (*Bactris gasipaes*).** *Ciência y Tecnología de Alimentos*, Campinas, 23(2): 251 - 255. Campinas, São Paulo - Brasil.

23. French D. (1984). **Organization of starch granules**. In: Starch: Chemistry and Technology. Whistler, R.L., BeMiller, J. N. and Paschall, E. F. (eds.). Academic Press., New York, pp: 183-247.
24. Gabas, A., L. (1998). **Secagem de Uva Itália em Leito Fixo**. Tesis de Maestría en Ingeniería de Alimentos. Facultad de Ingeniería de alimentos de la Universidad Estadual de Campinas Sao Paulo - Brasil.
25. García-Pérez J.V., Cárcel J.A., Clemente G. and Mulet A. (2008), **Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats**, LWT - Food Science and Technology, 41, 18-25.
26. 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 den Berg, C. 1980. Engineering and foods. Elsevier Applied Science. London. 1: 311-314.
27. Halsey, G. (1948). **Physical adsorption on non-uniform surfaces**. Journal of Chemical Physics, 16, 931 - 937.
28. Hubinger, M., D.; Pezantes, D., V.; Kurozawa, L., E.; Sobral, P., J., A. (2009). **Isotermas de desorção de filé de bonito (Sarda sarda) desidratado osmoticamente e defumado**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.13, n.3, p.305-311. Campina Grande, PB, UAEA/UFCEG - Brasil.
29. Iglesias, H., Chirife, J. (1982). **Handbook of Food Isotherms: Water Sorption Parameters for Food and Food Components**. New York: Academic Press.
30. Iguaz, A.; Vírveda, P. (2006). **Moisture desorption isotherms of rough rice at high temperatures**. Journal of food Engineering 79, 794 - 802.
31. Jimenez, M. E. (2012). **Elaboración de Harina de 3 Variedades de Plátano verde (*Musa spp*) y su uso como materia prima para la Panificación**. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de Post graduados. H. cárdenas, Tabasco.
32. Johnson, P y Brennan, J. (2000). **Moisture sorption isotherm characteristics of plantain (*Musa*, AAB)**. Journal Food Engineering. 44, 79-84.
33. Kapsalis, J. (1981). **Influence of hysteresis and temperature on Moisture sorption isotherms**. In Water Activity: Influence on Food quality. (Rockland, L. and Stewart, G) p . 173-203.
34. Kohayakawa, M. (2004). **Secagem de manga Haden utilizando secador de leito fixo e secador acoplado a bomba de calor**. Tese de Mestrado em Engenharia de Alimentos, facultade de Engenharia de Alimentos, Universidades Estadual de campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.

35. Kurozawa, L. E., El-Aouar, Â. A. e Murr, F. E. X. (2005). **Obtenção de isothermas de dessorção de cogumelo *in natura* e desidratado osmoticamente.** Ciência y Tecnología de Alimentos, Campinas, 25(4): 828-834. Campinas, São Paulo - Brasil.
36. Labuza, T. P. (1980). **The effect of water activity on reaction kinetics of food deterioration.** Food Technology 34, 36-42.
37. Leal, C. M. (2010). **Caracterização e análise experimental do recobrimento de sementes de jambu (*spilanthes oleracea*) em leite fluidizado.** Tese de Doutorado em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.
38. Lee, J., H., Lee, M., J. (2007). **Effect of drying on the moisture sorption isotherms for *Inonotus obliquus* mushroom.** Food Science and Technology 41: 1478 - 1484.
39. Madrigal-A., Guzmán, A., Bautista, J., García D.C.L., Vázquez G., Rodríguez-P., Moreno, R.V.H. (2006). **Producción y Caracterización Físico-química de Harinas de Bananos FHIA-17, FHIA-23 y Plátano FHIA-20, para su incorporación en panificación.** Revista, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Colima, Facultad de Ciencias Biológicas UANL, Instituto de Ciencias Agrícolas U de Guanajuato – México.
40. Marques, M. A. (2009). **Influência de encapsulantes e do método de secagem nas propriedades físico-químicas e atributos de qualidade de polpa de maracujá (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) em pó.** Tese de Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos, Área de Concentração: Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. São José do Rio Preto, São Paulo - Brasil.
41. Mathlouthi, M, Rogé, B. (2003). **Water vapour sorption isotherms and the caking of food powders.** Food Chemistry. 82: 61 - 71
42. Matos Ch., R., A. (1992). **Evaluación de modelos matemáticos de isothermas de sorción en Oca (*Oxalis tuberosa* mol), Olluco (*Ullucus tuberosus* loz) y algunos derivados.** Tesis de maestría - UNALM, Lima - Perú.
43. Moreira, P. (1999). **Estudo da cinética de desidratação por imersão e secagem de tomate cereja (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*).** Tese de Mestrado em Engenharia de Alimentos, Faculdades de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.
44. Mysels, K. J. (1967) **Introduction to colloid chemistry.** Interscience Publishers Inc. New York

45. Nascimento, F. M. (2006). **Secagem e armazenamento de polpa de pitanga (*Eugenia uniflora* L.)**. Tese de mestrado em Engenharia Agrícola, Área de concentração em armazenamento e processamento de productos agrícolas, Universidade Federal de Campina Grande. Campina grande, Paraíba - Brasil.
46. Oliveira, E. G., Rosa, G. S. Moraes, M. A. y Pinto, A. A. (2009). **Moisture sorption characteristics of microalgae (*Spirulina platensis*)**. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 26(1): 189-197.
47. Oswin, C. R. (1946). **The kinetic of package life. III Isotherm**. Journal of Chemical Industry, London, 65, 419 - 421.
48. Oviedo, Z., O. (1969). **La determinación de la cobertura monomolecular, como un método para evaluar la calidad de proteína y bondad del procesamiento en pasta de semilla de algodón**. Tesis - UNALM, LIMA - PERÚ.
49. Oyelade, O.J., T.Y. Tunde-Akintunde and J.C. Igbeka, (2008). **Predictive equilibrium moisture content equations for yam (*Dioscorea rotundata*, Poir) flour and hysteresis phenomena under practical storage conditions**. J. Food Engineering, 87(2): 229-235
50. Pérez Lizaur, Palacios Gonzales y Castro Becerra. **Cuad Sistema Mexicano de Alimentos Equivalentes**. Editorial Ogali. 3 ed. Pp. 29-37.
51. Pulla, H. P. (2011). **Determinación de las isotermas de adsorción del ají (*Capsicum annum* L.) seco**. Tesis de Ingeniero Agroindustrial. Facultad de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Madre de Dios - Perú.
52. Resende, O., Corrêa, P. C. Duarte, A. L. e Menezes, D. (2006). **Isotermas e calor isotérico de sorção do feijão**. Ciência y Tecnología de Alimentos, Campinas, 26(3): 626-631. Campinas, São Paulo - Brasil.
53. Reyes, G., M.; Gómez - Sánchez, P., I.; Espinoza, B., C.; Bravo, R., F.; Ganoza, M., L. y Centro Nacional de Alimentación y Nutrición (2009). **Tablas Peruanas de Composición de Alimentos**. Comité editor Instituto Nacional de Salud - Ministerio de Salud del Perú. Lima - Perú.
54. Rizvi, S.S.H. (1995). **Thermodynamic properties of foods in dehydration**. Engineering Properties of Foods , New York: Academic Press, Chap 4.
55. Rohvein, C., Santalla, E., Gely, M. C. (2004). **Estimation of sorption isotherm and the heat of sorption of quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild.) seeds**. Food Science and Technology International 10(6), 409-413.

56. Samapundo, S., F. Devlieghere, B. De Meulenaer, A. Atukwase, Y. Lamboni and J.M. Debevere, (2007). **Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn.** J. Food Engineering, 79(1): 168-175.
57. Sandoval,A; Barreiro, J.; Tovar,X. yAngueira,M. (2002). **Características de sorción del cacao fermentado en polvo (Theobroma cacao).** Rev.Téc. Ing. Universidad del Zulia. 25(1): 1-7.
58. Saravacos, G. D., Tsiourvas, D. A. y Tsami, E. (1986). **Effect of temperature on the water adsorption isotherms of sultanas raisins.** Journal of Food Science, 51(2): 381 - 387.
59. Sopade, P. A.; Ajisegiri, E. S. (1994). **Moisture sorption study on Nigerian foods: maize and sorghum.** Journal of Food Process Engineering, v. 17, n. 1, p. 33-56.
60. Soto M. (1991). **Bananos Cultivo y Comercialización 3º Edición** ed. Liltibas, Costa Rica. Pp 142, 565-573.
61. Stover R. H. and Simmonds, N. W. (1987). **Bananas 3 Edición** ed. Longman Group UK pp 391-398.
62. Telis, R., J.; Kohayakawa, M., N.; Silveira, V., JR.; Pedro, M., A., M.; Gabas, A., L. (2005). **Enthalpy-Entropy Compensation Based on Isotherms of Mango.** Ciencia Tecnología de Alimentos., Campinas, 25(2): 297-303. Campinas Sao Paulo-Brasil.
63. Timmermann, E. O.; Chirife, J.; IGLESIAS, H. A. (2001). **Water sorption isotherm of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters?.** Journal of Food Engineering, v. 48, n. 1, p. 19-31.
64. Tobin, G. y Muller, H. (1998). **Nutrición y ciencia de los alimentos**, Primera edición Edición Acriba, S.A.
65. TOLOBA, M. P.; PELTZER, M.; ENRIQUEZ, N.; POLLIO, M. L. (2004). **Grain sorption equilibria of quinoa grains.** Journal of Food Engineering, v. 61, n. 3, p. 365-371.
66. Torrealba, M., A. (2007). **Determinación de Isotermas de Sorción de Humedad en Harina Precocida de Plátano Verde (*Musa paradisiaca L.*).** Revista AGROLLANIA (Vol. 4) 2007: 9 - 22.
67. Tsami, E., Maroulis, Z. B., Marinos - Kouris, D. and Saravacos, G. D. (1990). **Heat of sorption of water in dried fruits.** International Journal of Food Science and Technology, 25: 350-359.
68. Valeriano, R: (2009). **Secagem por atomização do suco do açaí: Influência das variáveis do processo, qualidade e estabilidade do producto.** Tese de Doutorado em

Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidades Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo - Brasil.

69. Vazquez C. (CESAVECOL), A. Romero, J. Viera. (2005). (Distrito de Desarrollo Rural -02, Tecomán, “**Paquete tecnológico para el cultivo del plátano**” del PAQUETES TECNOLÓGICOS PARA CULTIVOS AGRÍCOLAS, EN EL ESTADO DE COLIMA – México.
70. Vega, A., Lara, E., Lemus, R. (2006). **Isotermas de Adsorción en Harina de Maíz (*Zea mays L.*)**. Ciencia Tecnología de Alimentos., Campinas, 26(4): 821-827. Campinas La Serena – Chile.
71. Viccina, G. (2006). **Determinación de las Isotermas de Sorción del Romero (*Rosmarinus officinalis L.*) y la Salvia (*Salvia officinalis L.*)**. Tesis de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Facultad de Industrias Alimentarias. Universidad Nacional Agraria La Molina.
72. Westgate, N.; Lee, J. Y.; Ladisch, M. R. (1992). **Modelling of equilibrium sorption of water vapour on starchy materials**. American Society of Agricultural Engineers, v. 35, n. 1, p. 213-219.
73. Wolf, W., Speiss, W. and Jung, G. (1985), **Standarization of isotherm measurement**. In Properties of water in Foods (Simantos, D., Multon, J., eds) pp661-667 Martinus Nijhoff Pub Netherland.
74. Zhang, X.; Liu, X.; Gu, D.; Zhou, W.; Wang, R. & Liu, P. (1996). **Desorption Isotherms of Some Vegetables**. Journl of the Science and Food Agriculture, 70: 303-306.
75. Zug, J. (2002a). **Isotermas de Adsorción: Bases Mecánico - Estadísticas**. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires - Argentina.
76. Zug, J. (2002b). **Fisicoquímica Especial. Isoterma de Sorción de tres etapas y modelos de sorción restringida**. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires - Argentina.

ANEXOS

**ANEXO 1: ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE LA HARINA DE PLÁTANO (*Musa paradisiaca L.*) VERDE:
MODELOS DE BET, GAB, HALSEY, OSWIN Y CHUNG – PFOST.**

Tabla 12: Valores experimentales y calculados de la humedad de equilibrio (X_e) de la harina de plátano (*Musa paradisiaca L.*) verde, obtenidos mediante los modelos evaluados a 35°C, 45°C y 55°C.

ISOTERMAS A 35°C, 45°C Y 55°C				Valores de Humedades de Equilibrio Calculados, X_e (cal.) ^a					
Solución Salina Saturada	Temperaturas	Actividad de Agua (a_w)	Humedad de Equilibrio (X_e) Exp.	BET	GAB	HALSEY	OSWIN	CHUNG - PFOST	
1	LiCl	35°C	0.1081	0.0433	0.0456	0.0458	0.0584	0.0493	0.0406
		45°C	0.1027	0.0349	0.0358	0.0323	0.0509	0.0438	0.0395
		55°C	0.0979	0.0220	0.0251	0.0222	0.0372	0.0319	0.0276
2	KC ₂ H ₃ O ₂	35°C	0.2155	0.0663	0.0664	0.0685	0.0715	0.0687	0.0580
		45°C	0.1974	0.0510	0.0524	0.0535	0.0597	0.0568	0.0553
		55°C	0.1818	0.0389	0.0373	0.0375	0.0436	0.0415	0.0395
3	Mg Cl ₂	35°C	0.3180	0.0882	0.0840	0.0857	0.0839	0.0851	0.0716
		45°C	0.3083	0.0732	0.0691	0.0733	0.0694	0.0696	0.0704
		55°C	0.2995	0.0549	0.0519	0.0554	0.0521	0.0527	0.0529
4	K ₂ CO ₃	35°C	0.4363	0.1109	0.1078	0.1054	0.1001	0.1045	0.0867
		45°C	0.4299	0.0902	0.0900	0.0915	0.0812	0.0833	0.0859
		55°C	0.4239	0.0707	0.0692	0.0712	0.0620	0.0643	0.0661
5	Mg (NO ₃) ₂	35°C	0.5154	0.1241	0.1286	0.1202	0.1131	0.1189	0.0972
		45°C	0.4970	0.1028	0.1047	0.1007	0.0887	0.0913	0.0947
		55°C	0.4803	0.0757	0.0788	0.0776	0.0673	0.0699	0.0722
6	NaCl	35°C	0.7429	0.1645	0.2534	0.1803	0.1753	0.1783	0.1347
		45°C	0.7258	0.1313	0.2027	0.1311	0.1281	0.1278	0.1312
		55°C	0.7101	0.1075	0.1513	0.1009	0.0995	0.0998	0.1016
7	KCl	35°C	0.8210	0.2214	0.3676	0.2128	0.2193	0.2150	0.1539
		45°C	0.7908	0.1394	0.2684	0.1399	0.1483	0.1444	0.1458
		55°C	0.7635	0.1011	0.1875	0.1059	0.1124	0.1104	0.1108

a: Valores de humedad de equilibrio en g agua/g m.s.

Fuente: **Elaboración propia (2012).**

ANEXO 2: HUMEDAD DE EQUILIBRIO DE LA HARINA DE PLÁTANO (*Musa paradisiaca L.*) VERDE: A LAS TEMPERATURAS DE ESTUDIO.

Tabla 13: Valores experimentales del cambio de peso de la muestra hasta alcanzar el equilibrio a las temperaturas de 35°C.

Compuesto	a_w	Peso	Día																				Porcentaje de Humedad Final	Humedad de equilibrio experimental final (X_e)			
		inicial 18 de Enero	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			21*	22**	
LiCl	0,1081	2,01	1,86	1,86	1,84	1,86	1,85	1,86	1,85	1,84	1,85	1,85	1,84	1,85	1,84	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,77	4,1516	0,0433
KC ₂ H ₃ O ₂	0,2155	2,03	1,90	1,88	1,87	1,88	1,88	1,88	1,88	1,87	1,88	1,88	1,87	1,88	1,87	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,78	5,3286	0,0663
Mg Cl ₂	0,3180	2,01	1,94	1,93	1,92	1,93	1,94	1,93	1,94	1,92	1,94	1,94	1,92	1,94	1,92	1,94	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,78	8,1034	0,0882
K ₂ CO ₃	0,4363	2,01	1,96	1,95	1,94	1,95	1,95	1,95	1,95	1,94	1,95	1,95	1,94	1,95	1,94	1,95	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,74	9,9828	0,1109
Mg(NO ₃) ₂	0,5154	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,77	11,0368	0,1241	
NaCl	0,7429	2,00	2,05	2,06	2,07	2,06	2,06	2,06	2,06	2,07	2,06	2,06	2,07	2,06	2,07	2,06	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	1,76	14,1234	0,1645	
KCl	0,8210	2,02	2,11	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	1,75	18,1250	0,2214	

* Último día en la que estabiliza la muestra a la temperatura de estudio de 35°C

** Peso de secado de la muestra para determinar el porcentaje de humedad final a 105°C

Tabla 14: Valores experimentales del cambio de peso de la muestra hasta alcanzar el equilibrio a las temperaturas de 45°C.

Compuesto	a_w	Peso	Día																	Porcentaje de Humedad Final	Humedad de equilibrio experimental final (X_e)			
		inicial 08 de Febrero	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17*			18**		
LiCl	0,1027	2,01	1,90	1,83	1,90	1,90	1,83	1,90	1,83	1,90	1,90	1,88	1,90	1,89	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,82	3,3688	0,0349
KC ₂ H ₃ O ₂	0,1974	2,00	1,95	1,89	1,93	1,92	1,89	1,91	1,88	1,88	1,92	1,93	1,94	1,93	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,83	4,8527	0,0510
Mg Cl ₂	0,3083	2,01	1,94	1,89	1,90	1,91	1,89	1,92	1,89	1,92	1,89	1,92	1,89	1,91	1,92	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,75	8,2024	0,0732
K ₂ CO ₃	0,4299	2,02	1,98	1,97	1,98	1,99	1,94	1,98	1,96	1,97	1,97	1,97	1,98	1,97	1,97	1,97	1,97	1,97	1,97	1,97	1,97	1,81	8,2770	0,0902
Mg(NO ₃) ₂	0,4970	2,01	1,99	1,98	1,97	1,98	1,98	1,99	1,97	1,97	1,97	1,98	1,96	1,96	1,97	1,97	1,97	1,97	1,97	1,97	1,97	1,78	9,3220	0,1028
NaCl	0,7258	2,01	2,02	2,02	2,02	2,03	2,05	2,02	2,03	2,01	2,01	2,04	2,02	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	1,78	11,6086	0,1313
KCl	0,7908	2,00	2,06	2,07	2,06	2,08	2,10	2,09	2,08	2,07	2,05	2,07	2,05	2,05	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	1,79	12,2349	0,1394

* Último día en la que estabiliza la muestra a la temperatura de estudio de 45°C

** Peso de secado de la muestra para determinar el porcentaje de humedad final a 105°C

Tabla 15: Valores experimentales del cambio de peso de la muestra hasta alcanzar el equilibrio a las temperaturas de 55°C.

Compuesto	a_w	Peso inicial 15 de Marzo	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9*	Día 10**	Porcentaje de Humedad Final	Humedad de equilibrio experimental final (X_e)
LiCl	0,0979	2,00	1,86	1,86	1,85	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,82	2,1505	0,0220
KC ₂ H ₃ O ₂	0,1818	2,00	1,88	1,88	1,87	1,88	1,88	1,87	1,87	1,87	1,87	1,80	3,7433	0,0389
Mg Cl ₂	0,2995	2,00	1,90	1,90	1,91	1,90	1,88	1,89	1,92	1,92	1,92	1,82	5,2083	0,0549
K ₂ CO ₃	0,4239	2,00	1,92	1,92	1,92	1,94	1,95	1,96	1,97	1,97	1,97	1,84	6,5990	0,0707
Mg (NO ₃) ₂	0,4803	2,00	1,94	1,94	1,95	1,96	1,98	1,99	1,99	1,99	1,99	1,85	7,0352	0,0757
NaCl	0,7101	2,00	2,03	2,04	2,05	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06	1,86	9,7087	0,1075
KCl	0,7635	2,00	2,04	2,04	2,05	2,06	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	1,88	9,1787	0,1011

* Último día en la que estabiliza la muestra a la temperatura de estudio de 55°C

** Peso de secado de la muestra para determinar el porcentaje de humedad final a 105°C

ANEXO 2: FOTOGRAFÍAS DEL ESTUDIO DE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE LA HARINA DE PLÁTANO (*Musa paradisiaca L.*) VERDE.

2.1. Acondicionamiento del insumo a estudiar.



Figura 17: Plátano (*Musa paradisiaca L.*) verde.

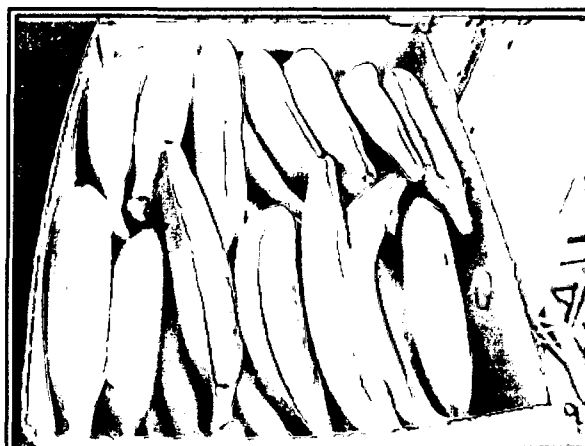


Figura 18: Plátano (*Musa paradisiaca L.*) verde embaladas para transportar.

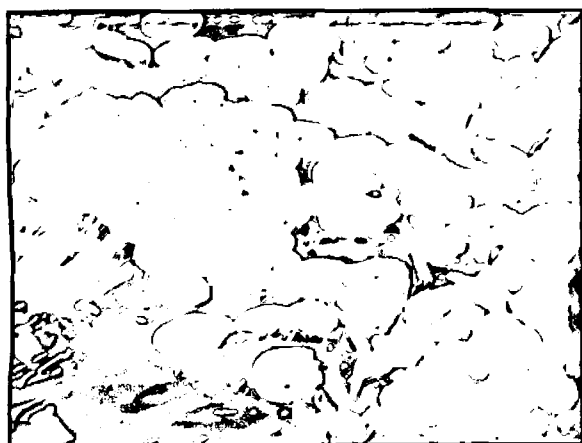


Figura 19: Hojuelas de Plátano (*Musa paradisiaca L.*) verde.

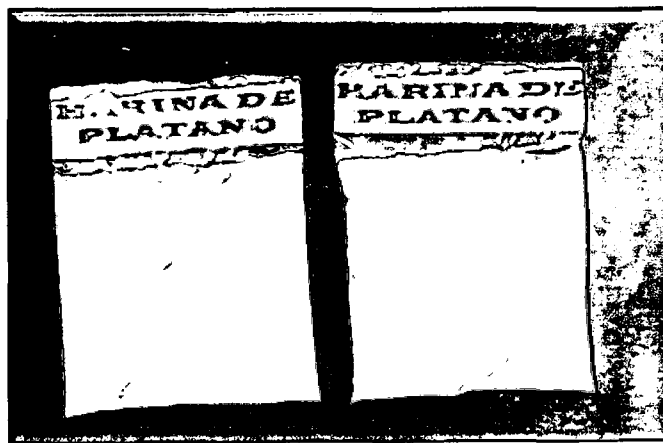


Figura 20: Harina de Plátano (*Musa paradisiaca L.*) verde.



Figura 21: Pesado de las muestras durante el secado.

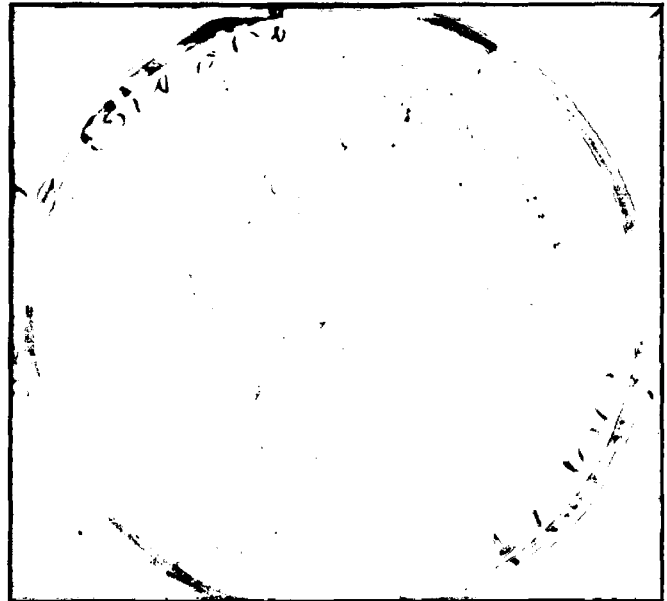


Figura 22: Muestra de harina de Plátano (*Musa paradisiaca L.*) verde.

2.2. Proceso de determinación experimental de las isotermas de adsorción de la harina de plátano (*Musa paradisiaca L.*) verde.

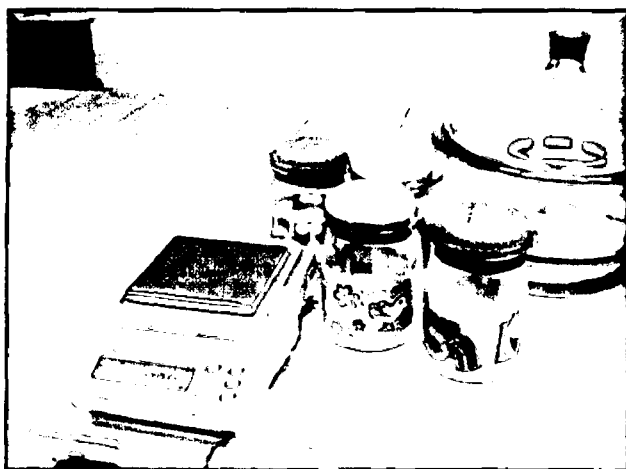


Figura 23: Pesado Inicial de las muestras de harina de plátano (*Musa paradisiaca L.*)



Figura 24: Campana desecadora conteniendo las muestras de harina de plátano ya pesadas.