

**UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ MARÍA ARGUEDAS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**



**CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO DE DOS VARIEDADES  
DE GRANOS DE KIWICHA (*Amaranthus caudatus*) A TRAVÉS  
DE MODELOS MATEMÁTICOS DE ISOTERMAS DE  
ADSORCIÓN**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
AGROINDUSTRIAL**

**AUTOR:** Bach. PERALTA GUEVARA, Diego Elio.

**ASESOR:** Ing. CHOQUE QUISPE, David MSc.

**COASESOR:** Ing. RIVAS LEGUÍA, Juvenal.

**ANDAHUAYLAS – PERÚ**

**2014**

**TESIS FINANCIADO POR LA DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN DE LA UNAJMA**

## DEDICATORIA

*Dedicado a mis padres, Serapio Peralta Velazque y Gladys Guevara Flores, por ser padres extraordinarios y ejemplares; a mis hermanos Josué, Danny, Ivan, Sergio y Benjamín por todo su apoyo a lo largo de toda mi formación.*

*Sí en vos mismo confías, ten en cuenta que es la última llave la que abre la puerta, la puerta a ese gran porvenir que te espera. Y aprende del reloj, que sin importar lo que haya pasado antes, todos los días arranca de cero... lumy Q.*

## **AGRADECIMIENTO**

- ✓ En primer lugar agradecer a mis padres, por darme la vida, brindarme su apoyo incondicional, su amor y consejos a lo largo de mi formación profesional, quienes siempre estuvieron en los momentos que siempre necesite, no solo como padre, si no como un mejor amigo y amiga.
- ✓ A Lumila Estefania Quaglia, que es una persona especial en mi vida, y ha sido parte de este esfuerzo, ya que me brindo todo su apoyo y comprensión a lo largo de este proceso.
- ✓ A la Universidad Nacional José María Arguedas y en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, por haberme provisto de excepcionales maestros quienes me brindaron sus conocimientos, y por permitirme hacer uso de sus instalaciones para realizar este trabajo de investigación,
- ✓ A mi asesor de tesis MSc. Ing. David Choque Quispe, quien desde el primer momento me ha brindado su apoyo a largo de mi formación profesional, no solo como docente en aula, sino también como un amigo y ahora en esta etapa me ha guiado y exigido durante todo el desarrollo de la investigación.
- ✓ Al Ing. Juvenal Rivas Leguía, coasesor de tesis por su comprensión, apoyo y consejos académicos durante mi formación profesional y a lo largo de este proceso.
- ✓ Al MSc. Ing. Carlos Alberto Ligarda Samanez, por todo el apoyo y conocimiento brindado en las aulas de clase y fuera de ellas.
- ✓ Así mismo a mis amigos en especial a Eliseo, Froilan, Edgar, Elibet, Yesica, Yavari, Beatriz, Delo y Fredy; al código 2009-I y a todos mis amigos de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, con quienes pase momentos inolvidables e hicieron de mi estancia universitaria un comfortable lugar de vida. Gracias por las carcajadas, comentarios fuera de lugar, enseñanzas y sobre todo su amistad.
- ✓ A mis jurados de tesis, por toda su paciencia y consejos brindados.

## PRESENTACIÓN

La presente investigación nace con la necesidad de obtener información de los parámetros de humedad relativa y temperatura para el manejo de las condiciones de almacenamiento de los granos de kiwicha en almacenes y centros de acopio ubicados en las zonas rurales de la provincia de Andahuaylas. La investigación tiene como objetivo primordial determinar las condiciones de almacenamiento de granos de Kiwicha (*Amaranthus caudatus*) de las variedades Oscar Blanco y Centenario, a través de las isothermas de adsorción. Y así minimizar las pérdidas económicas, debido al deficiente manejo durante su almacenamiento, transporte y exportación. La importancia que tiene el controlar los factores (temperatura y humedad relativa) en los granos de kiwicha es para evitar el crecimiento de los microorganismos y de esta forma no se altere la estabilidad del grano, ya que estos se ven favorecidos a actividades de agua superiores a 0.70 g de agua/g m.s.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
PRESENTACIÓN.....	iv
ÍNDICE GENERAL .....	v
ABREVIATURAS Y UNIDADES .....	xiii
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
CAPITULO I	
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes .....	2
1.2. Kiwicha ( <i>Amaranthus caudatus</i> ).....	11
1.2.1 Clasificación taxonómica .....	13
1.2.2 Nombres comunes.....	13
1.2.3 Composición química y aspecto nutricional .....	14
1.2.4 Variedades .....	16
1.2.5 Otras variedades en el mundo .....	18
1.2.6 Almacenamiento de la kiwicha .....	19
1.3. Isotermas de sorción.....	21
1.3.1. Modelos matemáticos para isotermas de adsorción.....	26
1.3.2. Sistemas de medición de isotermas de adsorción.....	30

1.4.	Actividad de agua .....	31
1.5.	Almacenamiento de granos y semillas .....	35
1.6.	Calor isostérico de adsorción .....	41
1.7.	Justificación.....	43
1.8.	Objetivos .....	45
1.9.	Problema.....	45
1.10.	Hipótesis .....	46
CAPITULO II		
MATERIALES Y METODOLOGÍA .....		
2.1.	lugar de ejecución.....	47
2.2.	Material de estudio.....	47
2.2.1.	Universo y/o población .....	48
2.2.2.	Muestra .....	48
2.3.	Equipos, materiales, reactivos e insumos de laboratorio .....	48
2.3.1.	Equipos .....	48
2.3.2.	Materiales.....	48
2.3.3.	Reactivos e insumos.....	49
2.3.4.	Materia prima .....	49
2.4.	Metodología .....	49
2.4.1.	Construcción de las isotermas de adsorción .....	50
2.4.2.	Preparación de soluciones saturadas .....	51

2.4.3.	Acondicionamiento de la muestra .....	52
2.4.4.	Determinación de la humedad de equilibrio .....	53
2.4.5.	Evaluación de la influencia de la temperatura en la humedad equilibrio en el almacenamiento .....	53
2.4.6.	Modelamiento de las isotermas de adsorción .....	54
2.4.7.	Evaluación de la monocapa <i>GAB</i> .....	55
2.4.8.	Determinación del calor isostérico $q_{ST}$ .....	55
CAPITULO III		
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	56
3.1.	Humedad de equilibrio .....	56
3.2.	Influencia de la temperatura en la humedad equilibrio .....	59
3.3.	Modelamiento de las isotermas de adsorción .....	60
3.4.	Parámetros fisicoquímicos de la isoterma de adsorción de <i>GAB</i> .....	74
3.5.	Evaluación del calor isostérico de adsorción .....	76
	CONCLUSIONES .....	84
	RECOMENDACIONES .....	85
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	86
	WEBGRAFÍA .....	96
	ANEXOS .....	97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1:	Composición química de la kiwicha en 100 g de porción comestible. ....	14
Tabla 1.2:	Composición química en 100 g de porción comestible.....	15
Tabla 1.3:	Aminograma y computo químico en diferentes variedades de kiwicha ( <i>g de aminoácido/16 g N</i> ). ....	16
Tabla 1.4:	Modelos matemáticos para ajuste de isotermas de adsorción, con dependencia e independencia de la temperatura.....	29
Tabla 3.1:	Humedad de equilibrio del grano de kiwicha de la variedad Oscar Blanco .....	56
Tabla 3.2:	Humedad de equilibrio del grano de kiwicha de la variedad Centenario.....	57
Tabla 3.3:	ANOVA de la influencia de la temperatura para la variedad Oscar Blanco .....	60
Tabla 3.4:	ANOVA de la influencia de la temperatura para la variedad Centenario.....	60
Tabla 3.5:	Parámetros de las isotermas a la humedad de equilibrio de las 2 variedades de granos de kiwicha a la temperatura de 18 °C.....	61
Tabla 3.6:	Parámetros de las isotermas a la humedad de equilibrio de las 2 variedades de granos de kiwicha a la temperatura de 20 °C.....	62
Tabla 3.7:	Parámetros de las isotermas a la humedad de equilibrio de las 2 variedades de granos de kiwicha a la temperatura de 25 °C.....	63
Tabla 3.8:	Parámetros de las isotermas a la humedad de equilibrio de las 2 variedades de granos de kiwicha a la temperatura de 30 °C.....	64
Tabla 3.9:	Parámetros fisicoquímicos de la isoterma de adsorción de <i>GAB</i> .....	74
Tabla 3.10:	Calor isostérico de adsorción para las 2 variedades de granos de kiwicha.....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1:	Los 5 tipos de isothermas de adsorción de Van der Waals.....	23
Figura 1.2:	Isothermas de adsorción y desorción e histéresis.....	24
Figura 1.3:	Método estático gravimétrico .....	31
Figura 1.4:	Mapa de estabilidad de los alimentos en función a la $a_w$ .....	34
Figura 1.5:	Esquema de los niveles de agua libre y agua ligada en un alimento.....	35
Figura 3.1:	Isothermas de adsorción del grano de kiwicha variedad Oscar Blanco.....	58
Figura 3.2:	Isothermas de adsorción del grano de kiwicha variedad Centenario.....	59
Figura 3.3:	Isothermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 18 °C, para los granos de kiwicha variedad Oscar Blanco.....	68
Figura 3.4:	Isothermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 20 °C, para los granos de kiwicha variedad Oscar Blanco.....	68
Figura 3.5:	Isothermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 25 °C, para los granos de kiwicha variedad Oscar Blanco.....	69
Figura 3.6:	Isothermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 30 °C, para los granos de kiwicha variedad Oscar Blanco.....	69
Figura 3.7:	Isothermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 18 °C, para los granos de kiwicha variedad Centenario.....	70

Figura 3.8: Isotermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 20 °C, para los granos de kiwicha variedad Centenario.....	70
Figura 3.9: Isotermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 25 °C, para los granos de kiwicha variedad Centenario.....	71
Figura 3.10: Isotermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 30 °C, para los granos de kiwicha variedad Centenario.....	71
Figura 3.11: Isotermas de adsorción ajustadas al modelo de Alan y Shove a 18 °C, para los granos de kiwicha de la variedad Oscar Blanco y Centenario.....	72
Figura 3.12: Isotermas de adsorción ajustadas al modelo de Alan y Shove a 20 °C, para los granos de kiwicha de la variedad Oscar Blanco y Centenario.....	72
Figura 3.13: Isotermas de adsorción ajustadas al modelo de Alan y Shove a 25 °C, para los granos de kiwicha de la variedad Oscar Blanco y Centenario.....	73
Figura 3.14: Isotermas de adsorción ajustadas al modelo de Alan y Shove a 30 °C, para los granos de kiwicha de la variedad Oscar Blanco y Centenario.....	73
Figura 3.15: Isotermas de adsorción para los granos de kiwicha variedad Oscar Blanco ajustadas al modelo de Alan y Shove, para evaluar el $X_e$ máximo.....	77

Figura 3.16: Isotermas de adsorción para los granos de kiwicha variedad Centenario ajustadas al modelo de Alan y Shove, para evaluar el $X_e$ máximo. ....	78
Figura 3.17: Logaritmo natural de $a_w$ en un función de la inversa de la temperatura, para el cálculo del calor isotérico de adsorción, para la variedad Oscar Blanco.....	79
Figura 3.18: Logaritmo natural de $a_w$ en un función de la inversa de la temperatura, para el cálculo del calor isotérico de adsorción, para la variedad Centenario.....	79
Figura 3.19: Influencia de la humedad de equilibrio en el calor isostérico de adsorción para los granos de kiwicha variedad Oscar Blanco.....	80
Figura 3.20: Influencia de la humedad de equilibrio en el calor isostérico de adsorción para los granos de kiwicha variedad Centenario.....	81

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 01: Sustancias químicas y sus ecuaciones para obtener $a_w$ a la temperatura deseada (en Kelvin) .....	98
Anexo 02: Variación de peso de los granos de kiwicha, hasta alcanzar la humedad de equilibrio ( $x_e$ ).....	99
Anexo 03: Propiedades del polietileno de alta densidad ( <i>HDPE</i> ) .....	107
Anexo 04: Imágenes de la investigación realizada. ....	108

## ABREVIATURAS Y UNIDADES

$X_m$	: Humedad de monocapa.
<b>GAB</b>	: Guggenheim, Anderson y Boer.
<b>BET</b>	: Brunauer-Emmet-Teller.
$R^2$	: Coeficiente de correlación de Pearson.
$\%E$	: Error medio relativo.
$X_e$	: Humedad de equilibrio.
<b>KJ</b>	: Kilo Joule.
<b>g</b>	: Gramo.
<b>FAO</b>	: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
$a_w$	: Actividad de agua.
$^{\circ}C$	: Grados Celsius.
$P_A$	: Presión parcial de vapor.
$C_A$	: Concentración de sólidos de una sustancia.
$C_{GAB}$	: Constante energética de <b>GAB</b> .
$k_{GAB}$	: Constante energética de <b>GAB</b> .
$C_{BET}$	: Constante energética de <b>BET</b> .
$n, n'$	: Constantes de Halsey.
$R$	: Constante universal de los gases.
$X_s$	: Contenido de humedad de seguridad.
<b>Kg</b>	: Kilogramo.
<b>mg</b>	: Miligramo.
<b>HRE</b>	: Humedad relativa.
$p_m$	: Presión de vapor de agua del alimento.
$p^v$	: Presión de vapor del agua pura.
$T$	: Temperatura absoluta.
$q_{st}$	: Calor isostérico neto de adsorción.
<b>EPIA</b>	: Escuela profesional de Ingeniería Agroindustrial.
<b>UNAJMA</b>	: Universidad Nacional José María Arguedas.
<b>INIA</b>	: Instituto nacional de innovación agraria.
$m_{eq}$	: Masa de la muestra en el equilibrio.
<b>m.s.</b>	: Masa de la muestra seca.

<b><math>H_A</math></b>	: Hipótesis alterna.
<b><math>H_0</math></b>	: Hipótesis nula.
<b><math>X_{ei}</math></b>	: Contenido de humedad experimental.
<b><math>X_{ci}</math></b>	: Contenido de humedad calculada.
<b><math>n</math></b>	: Número de observaciones.
<b><math>Kcal</math></b>	: Kilo calorías.
<b><math>HDPE</math></b>	: Polietileno de alta densidad.
<b><math>WVTR</math></b>	: Tasa de transferencia de vapor de agua.
<b><math>MC</math></b>	: Promedio de cuadrados
<b><math>gl</math></b>	: Grados de libertad
<b><math>SC</math></b>	: Suma de cuadrados

## RESUMEN

El objetivo principal fue modelar las condiciones de almacenamiento de granos de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) de las variedades Oscar Blanco y Centenario, mediante las isothermas de adsorción, para intervalos de humedad relativa de 10 a 90% a las temperaturas de 18 °C a 30 °C. Se estudiaron 11 modelos matemáticos, de ellos el modelo de Alan y Shove es el que se ajusta de mejor manera a las isothermas de adsorción ( $R^2 > 0.93$  y  $\%E < 9.2$ ) para ambas variedades de kiwicha. Se observó que la temperatura de almacenamiento influye significativamente en la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) de los granos de kiwicha; el valor de la monocapa de GAB ( $X_m$ ) para el grano de kiwicha de la variedad Oscar Blanco, oscila entre 0.0541 a 0.0673 g H<sub>2</sub>O/g m.s., mientras que para la variedad Centenario de 0.0446, a 0.0423 g H<sub>2</sub>O/g m.s.; el calor isostérico de adsorción como energía necesaria para remover el agua de monocapa adherida a las zonas polares activas de los diferentes constituyentes de los granos de kiwicha, oscila entre 6.3401 a 0.2346 KJ/g para humedades de 0.06 a 0.15 g de agua/g m.s para la variedad Oscar Blanco, mientras que para la variedad Centenario oscila entre 10.86 a 0.0223 KJ/g para humedades de 0.04 a 0.12 g de agua/g m.s.

*Palabras clave:* Kiwicha, Adsorción, monocapa ( $X_m$ ), humedad de equilibrio ( $X_e$ ) y calor isostérico de adsorción.

## ABSTRACT

The main objective was modeling the conditions storage of kiwicha grains (*Amaranthus caudatus*) of varieties Oscar Blanco and Centenario, intervening of the isothermal of adsorption, for intervals of relative humidity from 10 to 90 % and temperatures of 18°C to 30 °C. Studied To Him 11 mathematical models, of them Alan and Shove model is the one that fits up from better way the isothermal of adsorption (  $R^2$  0,93 and %E 9,2 ) for both kiwicha varieties. He observed than the temperature storage have influence significantly in the breakeven humidity (  $X_e$  ) of kiwicha grains; The value of GAB monolayer (  $X_m$  ) for kiwicha grain of variety Oscar Blanco, oscillate enter 0.0541 to 0.0673 g H<sub>2</sub>O/g m.s., in the meantime than for variety Centenario of .0446, to 0.0423 g H<sub>2</sub>O/g m.s.. Heat isostérico of adsorption like necessary energy to remove the water from adhered monolayer to the active polar zones of the different constituent members of kiwicha grains, oscillate enter 0.3401 to 0.2346 KJ/g for humidities of 0.06 to 0.15 g de agua/g m.s for variety Oscar Blanco, in the meantime than for variety Centenario oscillate enter 10.86 to 0.0223 KJ/g for humidities of 0.04 to 0.12 g de agua/g m.s.

*Key words:* Kiwicha, Adsorción, monolayer ( $X_m$ ), equilibrium humidity ( $X_e$ ), heat isostérico of adsorption.

## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN

La conservación de los cereales ha sido, es y será motivo de preocupación para el hombre, debido a la necesidad que tiene de preservarlo de factores físicos y microbiológicos del ambiente. Un reporte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO (1993) dice que el 30 % de los cereales alimenticios post cosecha se pierde en los países del mundo en vías de desarrollo a causa de la manipulación inadecuada, deterioro y plagas. En la provincia de Andahuaylas, este inconveniente no es ajeno, en especial en la zona rural donde los agricultores utilizan lugares poco apropiados para la conservación y almacenaje de los granos de kiwicha, sin el control adecuado de temperatura y humedad relativa del medio. Los cereales están constituidos principalmente de carbohidratos, que además contienen proteínas y lípidos en bajas concentraciones. El agua adsorbida en el producto se encuentra en equilibrio con el agua en estado de vapor en el aire de la atmósfera que lo rodea, por eso se suele llamar también humedad relativa en el equilibrio (%*HRE*). Las isotermas de adsorción son el medio por el cual se evalúan las condiciones de almacenamiento de los granos de kiwicha y con ayuda de modelos matemáticos evaluar parámetros de humedad relativa y temperatura, de esta manera monitorear mejor su almacenamiento.

La presente investigación se limita sólo a determinar las condiciones de almacenamiento de granos de Kiwicha (*Amaranthus caudatus*) de las variedades Oscar Blanco y Centenario, a través de las isotermas de adsorción, por tanto no se abordarán los aspectos microbiológicos, enzimáticos, transferencia de masa, etc.

## 1.1. ANTECEDENTES

- ✓ **Assis et al., 1999.** En su investigación “**Secado de SESAME natural y determinación de la humedad de equilibrio**”, El secado natural consistió en la exposición de la planta a la luz solar. Este proceso se llevó a cabo para que las semillas alcancen un contenido de humedad de aproximadamente 6 % en base húmeda. La humedad de equilibrio se determinaron utilizando soluciones de ácido sulfúrico, con 98 % de pureza para una Humedad relativa 17 – 85 %. Las muestras se almacenaron en frascos herméticos que contienen sus soluciones y llevados a incubadoras con temperatura controlada de 20, 30 y 40 °C ± 1 °C Para adaptarse a los modelos de isothermas de adsorción *BET*, *GAB*, *Oswin* y *Halsey* fueron probados con el fin de obtener sus coeficientes usando regresión no lineal. Antes de que los resultados, se concluyó 35 días la necesidad de que las semillas alcanzar la humedad de 6,1 % base húmeda y el modelo *GAB* fue el mejor ajuste a los datos experimentales.
  
- ✓ **Prieto et al., 2006.** En su investigación “**Evaluación de las isothermas de sorción en cereales para desayuno**”, Los cereales son alimentos altamente higroscópicos que alcanzan el equilibrio de adsorción rápidamente. En este estudio se evaluaron tres cereales para desayuno, los cuales a  $a_w=0.10$ , ceden humedad al medio. A partir de valores de  $a_w$  de 0.53, manifiestan sus capacidades de adsorción de humedad con el tiempo. El arroz manifestó los menores valores de capacidad de adsorción por el contrario el maíz presento la más alta capacidad de hidratación. Las isothermas de adsorción según el modelo de *GAB* permitieron determinar los valores de adsorción de agua de los cereales a nivel de la monocapa ( $M_0$ ), en donde el mayor grado de adsorción fue para maíz, seguido del trigo y finalmente arroz. La elevada capacidad de

sorción del cereal de maíz a nivel de la monocapa está relacionada con el alto contenido de azúcares en el cereal (41 %) y las propiedades típicas de sorción de estos. A valores altos ( $a_w = 0.80$ ) la capacidad de adsorción de agua para los tres cereales es similar.

- ✓ **Schmalko, et al., 2008. En su investigación “Isotermas de adsorción del polvo de la yerba mate con aglomerantes utilizados en el atrapamiento de compuestos”**, Con el objeto de atrapar edulcorantes para ser utilizados en el mate se está estudiando la posibilidad de utilizar el polvo de la yerba mate, subproducto de la molienda, junto con aglomerantes, para formar partículas con un tamaño mayor a 420 micrómetros (retenido por malla 40). Al ser incorporado el edulcorante atrapado, se tendría una salida lenta, lo que favorecería su consumo en el mate. Cuando se agrega el edulcorante en forma directa, la extracción tiene lugar en los primeros mates, produciéndose un sabor fuerte y desagradable, y se vuelve imperceptible con el progreso de la mateada. Para ser incorporado este compuesto a la yerba mate antes de ser envasada se debe conocer la humedad de equilibrio para que no inestabilice a la misma (actividad de agua menor a 0.6). El objetivo de la investigación fue determinar las isotermas de adsorción del polvo de la yerba mate conteniendo aglomerantes en todo el rango de temperatura que se almacena y comercializa la yerba mate. Las isotermas de adsorción se determinaron utilizando el método estático, con soluciones salinas saturadas a cuatro temperaturas diferentes: 20, 30, 40 y 50 °C. Se utilizaron tres aglomerantes: goma arábiga, maltodextrina y almidón de mandioca al 10 % *p/p*. Las determinaciones se realizaron por triplicado. La diferencia en los contenidos de humedad de los diferentes materiales a una temperatura y  $a_w$  fue muy pequeña. En ningún caso

superó el valor de 2.51 %. Los datos experimentales se ajustaron a los modelos de *GAB* y Halsey. Con el modelo de *GAB* se obtuvieron errores promedios elevados y las constantes del modelo en algunos casos tuvieron valores muy elevados, por lo que se seleccionó el modelo de Halsey. En primer lugar se ajustaron los valores para cada una de las temperaturas, resultando un error promedio porcentual de 6.48 %. Luego se ajustaron las constantes ( $a$  y  $r$ ) en función de la temperatura, con un modelo tipo Arrhenius, obteniéndose una sola ecuación para cada material. En este caso el error promedio porcentual resultó de 7.44 %, que difiere muy poco del ajuste anterior. Los valores de las constantes de Halsey ( $a$  y  $r$ ) fueron mayores en el polvo sin aglomerante que en los materiales que contenían aglomerantes. Se encontraron valores de la constante  $a$  entre 6.15 y 24.18 y de  $r$  entre 1.23 y 1.86. De igual manera los valores de energía de activación de las constantes  $a$  y  $r$  fueron superiores en el polvo sin tratar. También se calcularon los valores de contenido de humedad de equilibrio para una actividad de agua igual a 0.6 (a 30 °C). Los mismos variaron entre 7.86 y 8.33 % (base seca). No se encontraron diferencias significativas entre estos contenidos de humedad entre los diferentes materiales ni a las diferentes temperaturas. Estos valores eran menores a los que tiene la yerba mate (9.5 % aproximadamente).

- ✓ **Choque, 2009., En su investigación “Isotermas de adsorción de maíz morado (*Zea mays L.*)**, Los cereales son alimentos altamente higroscópicos que alcanzan el equilibrio de adsorción rápidamente. El objetivo de esta investigación fue determinar las isotermas de adsorción del maíz morado de la variedad canteño a las temperaturas de 18 °C, 25 °C y 30 °C, para el rango de  $a_w$  entre 0.065 a 0.95. El contenido de humedad de equilibrio de los granos de

maíz morado fue determinado por el método de control continuo de cambios de peso. Se observó que la humedad de equilibrio disminuye con el incremento de la temperatura, las isothermas presentan un entrecruzamiento a la  $a_w$  de 0.70 para una humedad de equilibrio,  $X_e$ , de 0.17 g de agua/g m.s. Se utilizaron siete modelos matemáticos, de ellas las isothermas de GAB y Halsey se ajustaron mejor al comportamiento experimental de adsorción del maíz morado, presentando valores del coeficiente de determinación  $R^2$  superiores al 97 %,  $mea$  menores del 10 %,  $SEE$  menores a 0.014 y una dispersión de los residuales aleatoria. La humedad de la monocapa,  $X_m$ , presentó dependencia con la temperatura, disminuyendo de 0.079 a 0.065 g de agua/g m.s. de 18 °C a 30 °C. A partir del modelo de Halsey se calculó los valores de  $X_e$  para obtener los datos del calor isostérico de adsorción,  $q_{st}$ , observándose que esta aumenta con la disminución de la humedad de equilibrio, es decir que aumenta la energía necesaria para la remoción del agua, de 0.0165 - 7.7022 kJ/g para el rango de humedad de equilibrio de 0.17 a 0.07 g de agua/g m.s. Así mismo se calculó la energía de activación  $E_a$  utilizando la ecuación de Arrhenius, para las variables termodinámicas  $X_m$ ,  $k$  y  $C_{GAB}$ , presentando valores de -10.95, 6.82 y 18.84 kJ/mol, respectivamente.

- ✓ **Ceballos et al., 2009. En su investigación “Evaluación de varios modelos de isothermas de adsorción de agua de un polvo de fruta deshidratada”,** En esta investigación se compararon las isothermas de adsorción a 20 °C, 30 °C, 40 °C y 50 °C de polvos de guanábana (*Annona muricata* L.) adicionado con maltodextrina (MD) obtenidas por método gravimétrico estático de soluciones de sales saturadas, y se evaluó el ajuste de los datos experimentales a los modelos de GAB (Guggenheim – Anderson – de Boer), Oswin, Henderson y

Peleg. Se mostró la influencia de la temperatura en los resultados de los parámetros de los diferentes modelos; los valores de humedad de la monocapa ( $X_m$ ) obtenidos con el modelo de *GAB* para los polvos de guanábana, estuvieron entre 6.18 % a 8.50 % (*kg de agua/kg sólido seco*). Las isotermas presentaron forma sigmoidea características del tipo III. Se identificó la existencia de puntos de inversión en las isotermas para todas las temperaturas entre 0.63 y 0.70 de  $a_w$ , aumentando ligeramente al aumentar la diferencia de temperaturas. Se concluyó que el modelo que mejor se ajusta para el polvo de guanábana con *MD* es el de *GAB* seguido del modelo de Oswin.

- ✓ **Lara et al., 2009., En su investigación “Estudio de secado industrial de la quinua (*Chenopodium quinoa willd*) cultivada en Chile”** El objetivo de esta investigación fue estudiar las isotermas de sorción a tres temperaturas (20, 40 y 60 °C), y la cinética de secado a cinco temperaturas (40, 50, 60, 70 y 80 °C) de la quinua (*Chenopodium quinoa willd*). Además, se estudió el efecto de la temperatura del aire de secado sobre propiedades fisicoquímicas y actividad antioxidante. El modelo de Iglesias-Chirife mostró un buen ajuste de los datos experimentales de sorción. El modelo de Page modificado obtuvo el mejor ajuste para las curvas de secado basados en los test estadísticos aplicados ( $r^2$ ,  $SSE$  y  $X^2$ ). Las propiedades fisicoquímicas no presentaron grandes variaciones. La quinua fresca presentó la mayor actividad antioxidante seguida de las muestras tratadas a 40, 60 y 80 °C.
  
- ✓ **Rangel et al., 2010., En su investigación “Isotermas de sorción de rodajas liofilizadas de Noni (*Morinda citrifolia*) deshidratada osmóticamente”,** Con el objetivo de proveer alimentos sanos y de buena calidad a la población, es

importante utilizar tecnologías que permitan la conservación de alimentos, sobre todo para aquellas frutas de temporada que son sensibles a la temperatura de almacenamiento como es el caso de *Morinda citrifolia* comúnmente conocido como Noni. El fruto es de color blanco amarillento, suave y fétido cuando madura, además de tener una vida de anaquel corta. Dentro de las nuevas tecnologías no térmicas para la conservación de alimentos se encuentran: la deshidratación osmótica y la liofilización, las cuales fueron utilizadas para ampliar la vida de anaquel de la pulpa de Noni. Se determinaron isothermas de sorción de rodajas liofilizadas de Noni (*Morinda citrifolia* L.) sometido a dos procesos de deshidratación osmótica a 40 y 50 °Brix a 25 °C. Las isothermas de sorción se determinaron utilizando el método Gravimétrico de soluciones saturadas de sal en el intervalo de humedad relativa del 11 al 89 %, almacenadas a 15, 35 y 34 °C, obteniéndose isothermas de sorción del Tipo I.

- ✓ **Andrade et al., 2011.** En su investigación “modelos de isothermas de adsorción para alimentos: usos y limitaciones”, menciona que Las isothermas de sorción describen la relación entre el contenido de humedad y la actividad de agua de un alimento. Esta investigación presenta los conceptos básicos relacionados con la termodinámica de la sorción de agua, clasificación de las isothermas, “usos y limitaciones de los modelos”, y la medición de las isothermas de sorción de materiales alimenticios. Los modelos más utilizados en los alimentos son los de Brunauer-Emmett-Teller y Guggenheim-Anderson-de Boer. El éxito del modelo de Brunauer-Emmett-Teller es más bien cualitativo, considerando que en la mayoría de casos sólo es lineal en un rango limitado de actividad de agua de 0.05 a 0.45, por lo que su aplicabilidad principal es la

estimación de áreas de superficies y el modelo de Guggenheim-Anderson-de Boer su uso es generalizado por su bases teóricas, simplicidad matemática y fácil interpretación, pero se desvía a actividad de agua superior a 0.93.

- ✓ **Ayala, 2011., En su investigación “Estimación de las isothermas de adsorción y del calor isotérico en la harina de yuca (*Manihot esculenta*, Crantz)”**, Se determinaron las isothermas de adsorción de humedad en harina de yuca (*Manihot esculenta*, Crantz) a 20, 25, 30 y 35 °C mediante el método gravimétrico en el intervalo de actividad de agua entre 0.111 y 0.901. Los valores experimentales de adsorción se ajustaron mediante los modelos de GAB, BET, Oswin, Smith, Henderson y Chung and Pfof. El calor isostérico de sorción ( $Q_{st}$ ) se determinó mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron. Las isothermas obtenidas presentaron una forma sigmoidea (Tipo II). El contenido de humedad de equilibrio (*CHE*) disminuyó con el aumento de la temperatura para un valor constante de actividad de agua. Los modelos de sorción GAB, Oswin y Smith fueron los que mejor ajustaron los valores experimentales. El  $Q_{st}$  disminuyó con el aumento del *CHE* obteniéndose un valor máximo y un mínimo entre 118.84 y 45.20 *kJ/mol* para humedades entre 5 y 35 (*g agua/g m.s.*) respectivamente.
  
- ✓ **Ramírez, 2012., En su investigación “Determinación de las isothermas de sorción de maíz a tres temperaturas y su ajuste a modelos matemáticos”**, la valiosa información que aporta el conocimiento de los parámetros termodinámicos y de humedad de monocapa, que describen el comportamiento de la harina durante su distribución y almacenamiento; así como de los valores de humedad seguros que se deben alcanzar para lograr un almacenamiento

exitoso. Por ello esta investigación aporta estos datos, utilizando como materia prima las harinas nixtamalizadas por las grandes empresas (industrial), así como las obtenidas por los pequeños productores (tradicional). Para esto se construyeron isotermas de sorción a tres temperaturas (24, 30 y 35 °C), en un intervalo de actividad acuosa de 0.074 a 0.970 por el Método de Celda en Equilibrio (*PEC*). Las isotermas obtenidas, para ambas muestras, presentan una forma de tipo II, de las cinco establecidas por Brunauer. Se determinó el valor de monocapa con las ecuaciones de *GAB* y *BET* cuyos valores se ubicaron entre 0.06-0.14 (*g de H<sub>2</sub>O/g de sólido seco*) para harina nixtamalizada industrial y 0.11-0.15 (*g de H<sub>2</sub>O/g de sólido seco*) para harina nixtamalizada tradicional. Se determinó el contenido de humedad de seguridad ( $X_s$ ), que indica el contenido de humedad al cual se lograría la máxima estabilidad del alimento durante su almacenamiento con la ecuación de Caurie cuyos valores se ubicaron entre 0.03 y 0.04 (*g de H<sub>2</sub>O/g de sólido seco*). Finalmente se evaluó el calor isostérico de sorción requerido por la Harina de Maíz Nixtamalizada para alcanzar el equilibrio, mediante la ecuación de Clausius – Clapeyron. Los valores de la energía libre de Gibbs están en un intervalo de -386±3.61 para harina nixtamalizada industrial y de -161±1.22 para harina nixtamalizada tradicional, por lo que se concluye que el proceso es espontáneo; los valores de entalpía indican que existen fuerzas atractivas en el proceso de sorción y los valores están comprendidos de -16.9±1.2 para harina nixtamalizada industrial y de -15.06±0.6 para harina nixtamalizada tradicional; los valores de entropía están en un intervalo de 13.15±4.6 para harina nixtamalizada industrial y de 5.09±1.3 para harina nixtamalizada tradicional, lo que indica que el proceso de sorción en la interfase agua-soluto es no

estructurado o de alto desorden, debido a que al someterlo a un cambio de estado, este rompe su equilibrio inicial y ocurre un desorden en el sistema.

- ✓ **Peña y Carballo, 2013., En su investigación “Isotermas de adsorción de agua de harina de amaranto (*Amaranthus caudatus*)”**, Las isotermas de sorción de agua son únicas para los materiales alimenticios individuales y se pueden utilizar directamente para predecir la vida útil y determinar las condiciones de almacenamiento apropiadas. En este contexto, el objetivo de este estudio fue determinar las isotermas de adsorción de humedad de la harina de amaranto a 15 °C, 25 °C y 35 °C en un intervalo de actividad de agua de 0.1 a 0.9, los datos experimentales se modelaron usando cinco ecuaciones comúnmente aplicadas en el campo de los alimentos. La bondad del ajuste para cada modelo de isoterma se evaluó mediante el coeficiente de determinación, la varianza debida al error y el intervalo de confianza de los parámetros estimados. Todos los modelos pueden predecir las isotermas de adsorción de harina de amaranto, pero la ecuación *GAB* da una mejor comprensión del comportamiento de absorción observado. Contenido de agua de adsorción monocapa estimados variaron de 6.4 g a 7.2 g de agua por 100 g de material seco. Se observó una dependencia débil de la actividad del agua con la temperatura. Para asegurar la estabilidad microbiológica, el contenido de agua en la harina de amaranto no debe ser superior a 13 g de agua por 100 g de materia seca.

## 1.2. **KIWICHA (*Amaranthus caudatus*)**

Es un grano originario de América del sur donde fue domesticado, comúnmente cultivada durante el tiempo de los Incas en el Perú y de los aztecas en México (Lazarte, 2006). Desde la época colonial ha disminuido notablemente la superficie cultivada de kiwicha. Su cultivo se mantiene sin embargo en Ecuador, Perú, Bolivia y Argentina, debido a la persistencia de los agricultores andinos, y sigue teniendo importancia por su excelente calidad nutritiva.

El valor nutritivo del grano es elevado, alcanza 12-16 por ciento de proteínas, el balance de aminoácidos es óptimo, con una buena proporción de los azufrados: lisina, metionina y cistina. (Higinio, 2011)

Junto con la quinua y otros cultivos andinos, tiene un alto contenido proteínico, fue una de las plantas alimenticias que consumieron los cazadores y recolectores de Norte América y los andes, antes de la domesticación de la planta en Mesoamérica; Mac Neish en sus excavaciones en Puebla (México) encontró kiwicha junto con maíz y frijol en este proceso de domesticación. La kiwicha de las cuevas de Tehuacán en Puebla data de 4000 años a.C. en tanto que la fecha más antigua en América del sur es de 2000 años y viene de urnas funerarias de Salta (Argentina). (Higinio, 2011)

Es originario de la zona andina peruana. Las formas nativas se desarrollan en los departamentos de Cusco, Ayacucho y Cajamarca, esta variedad se ve reflejada también en los colores de los granos, además de una diversidad de nombres populares en los valles interandinos sudamericanos. Varios indicios arqueológicos de excavaciones realizadas en Junín, muestran el hallazgo de restos vegetales de kiwicha, los mismos que al ser sometidos a pruebas de

carbono-14 ponen de manifiesto una antigüedad de 12000 años a.C., de este modo se deja reflejado la importancia que tuvo este grano para los Incas. (Chapilliquén y Alvis, 2006).

La kiwicha tradicionalmente se siembra en los valles interandinos zona "Quechua", zona ecológica ubicada entre 2700 - 3500 m.s.n.m. crece al igual que el maíz en la costa, sierra y selva hasta los 3000 m.s.n.m. a diferencia del maíz se necesita menos cantidad de agua para su riego. (Higinio, 2011)

La kiwicha tiene una enorme demanda como producto de exportación, especialmente si se le cultiva de manera orgánica. El año 2003 países como Alemania, Estados Unidos, Japón, Holanda, Bélgica, Canadá, España, Italia y Nueva Zelanda, han importado cerca de 950 toneladas de kiwicha proveniente del Perú. Diversas comunidades de las provincias de Andahuaylas, Abancay y Cusco han cultivado 150 hectáreas de Kiwicha, la cual ha sido certificada como orgánica y es exportada a Europa y EE.UU. ([www.peruecologico.com](http://www.peruecologico.com))

Tiene usos muy variados como:

- ✓ Las hojas se consumen cocidas, añadiéndolas a las sopas.
- ✓ Los tallos han comenzado a usarse en la preparación de bebidas rehidratantes.
- ✓ Los granos o semillas sirven para la elaboración de un sinnúmero de platos alimenticios, tanto dulces como salados, cocidos o tostados, y también en forma de harina.
- ✓ Las hojas cocidas son utilizadas para inflamaciones de la vejiga, dolores reumáticos, y menstruación excesiva.
- ✓ La infusión obtenida de los tallos actúa como un efectivo laxante.

- ✓ La cocción de las hojas en agua, y mediante gárgaras empleando únicamente agua, es útil contra la irritación de boca y garganta.
- ✓ Por su contenido de ácido aspártico, la kiwicha combina con otros aminoácidos capaces de absorber toxinas del torrente sanguíneo, combatiendo las enfermedades hepáticas y renales.
- ✓ Según algunos estudios, la kiwicha ayuda a estabilizar la glucosa y grasa en la sangre, siendo aconsejable para pacientes con diabetes, obesidad, hipertensión arterial, estreñimiento y colesterol elevado.  
(www.peruecologico.com).

### 1.2.1 CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Subclase: Caryophyllidae

Orden: Caryophyllales

Familia: Amaranthaceae

Género: Amaranthus

Especie: Caudatus

(www.peruecologico.com)

### 1.2.2 NOMBRES COMUNES

- **Aymara:** Kiwicha, Amaranthus, triguinka, achis, achita, chaquilla, sangorache, borlas.
- **Quechua:** Kiwicha, inkahakatu, sankurachi, hawarcha, millmi, quymi.
- **Francés:** Amarante caudeé, amarante queue de renard.
- **Inglés:** Love-lies-bleeding, red-hot, bush green, tassel flower, quilete.

- **Portugués:** Amaranto de cauda.

### 1.2.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA Y ASPECTO NUTRICIONAL

Las semillas de Kiwicha tienen un interés excepcional alimenticio debido a los estudios que demuestran su gran potencial de proteína. La kiwicha tiene una composición más equilibrada que los cereales convencionales y una mayor cantidad de proteínas de calidad (Chipana y Stuva, 2005).

El valor nutritivo de la kiwicha es indiscutible, diversos estudios realizados han comprobado su alta calidad proteica en relación a otros cereales.

En la siguiente tabla se muestra el contenido nutricional de la kiwicha, comparando resultados de dos autores.

**Tabla 1.1:** Composición química de la kiwicha en 100 g de porción comestible.

Componentes	kiwicha	
	1*	2**
Energía (Kcal)	377	361.6
Análisis Prox. (g)		
Humedad	12.0	12.4
Proteína	13.5	12.5
Grasa	7.1	7.15
Carbohidratos	64.5	63.49
Fibra	2.5	1.9
Ceniza	2.4	2.32
Minerales (mg)		
Calcio	236.0	95.32
Hierro	7.5	1624.8
Potasio	-	494.0
Vitaminas (mg)		
Tiamina	0.30	0.012
Riboflavina	0.01	0.31
Niacina	0.40	6.43
Ac. Ascórbico	1.3	-
Piridoxina	-	0.72

Fuente:\*Collazos, 1998, \*\*Tapia, 2000.

La siguiente tabla muestra que la kiwicha tiene el nivel más alto en la proteína, el calcio y el hierro en comparación con el grano de trigo, maíz, el arroz y la avena, que hace que la kiwicha sea un alimento excepcional.

**Tabla 1.2:** Composición química en 100 g de porción comestible.

<b>Clase/Grano</b>	<b>Kiwicha</b>	<b>Trigo</b>	<b>Maíz</b>	<b>Arroz</b>	<b>Avena</b>
Proteína (g)	13.5	12.8	9.4	5.6	15.8
Fibra (cruda), (g)	2.5	2.3	3	0.3	3
Grasa (g)	7.1	1.7	4.7	0.6	6.9
Carbohidratos (g)	64.5	71	74	79.4	66
Calcio (mg)	236	29.4	7	9	54
Hierro (mg)	7.5	4	2.7	4.4	5
Energía (Kcal)	377	334	365	360	389

Fuente: Collazos, 1998.

Lo extraordinario de la proteína de kiwicha es su riqueza en aminoácidos esenciales incluyendo la lisina y la metionina, los cuales como es bien sabido tienen una proporción que limita el valor biológico de los cereales. La eficiencia proteica es comparable con la caseína (Sánchez, 1983). Las proteínas difieren en valor nutritivo, debido a las diferencias en la clase y cantidad de sus aminoácidos constitutivos. La lisina es el primer aminoácido limitante en los cereales. La proteína de la kiwicha contiene niveles relativamente altos de lisina (50 %) casi el doble del trigo y tres veces más que el maíz y contenidos de aminoácidos azufrados (4.4 %) en comparación a los granos más comunes (Castro, 1987).

**Tabla 1.3:** Aminograma y computo químico en diferentes variedades de kiwicha (g de aminoácido/16 g N).

Aminoácido	Amaranthus					P. FAO 1993	PP. Es. FAO
	Caudatus		Cruentus	Hipocho	Edulis		
	a.	a.1	B	b	c		
Isoleucina	3.5	3.2	-	-	4.1	4	2.8
Leucina	5.4	5.4	5.5	5.6	6.3	7	6.6
Lisina	6.4	6.0	5.4	5.6	5.9	5.4	5.8
Fe + Tir	7.2	6.4	6.7	7.2	8.1	6.1	6.3
Met + Cis	4.8	6.1	4.2	4.5	4.9	3.5	2.5
Treonina	3.6	3.3	3.2	3.4	4.0	4	3.4
Triptofano	1.2	1.1	-	-	1.1	1.0	1.1
Valina	4.6	3.8	4.3	4.2	4.7	5	3.5
Computo							
Químico	84.6	-	-	-	73	100	100
1er aminoácido limitante	leu	leu	Leu	leu	leu	-	-

Fuente: a: Análisis de una muestra de Kiwicha (Cusco). Degussa A.C. Fran Kfurt R.F.A.a.1: Repo Carrasco (1992), b: Sánchez Marroquín (1983)c: Becker (1981), d: Patrón FAO (1973),e: Patrón Pre-escolar FAO (1985).

#### 1.2.4 VARIEDADES

Se han encontrado numerosas especies en los andes, generalmente se les distingue por la forma de la panoja, el color del tallo, el fruto y la semilla. Sus semillas son traslúcidas y producen harina y hojuelas de buena calidad. Alrededor de 1200 variedades aún se mantienen en los Andes. (Castro, 1987).

La distribución geográfica del género *Amaranthus* en amplias zonas de la cordillera andina ha dado lugar a numerosas variedades. Es así que a lo largo de los andes se han colectado al menos 1200 variedades de kiwicha, las cuales se diferencian por sus granos, forma de la panoja o panícula, color de la planta y otras características. ([www.peruecologico.com](http://www.peruecologico.com)).

Las variedades más conocidas de kiwicha son:

- ✓ **Centenario:** este es un grano de color crema, presenta una inflorescencia de color verde, presenta granos pequeños, es la segunda variedad más sembrada en el Perú, crece entre los 1000 y 3200 m.s.n.m., no contiene saponinas ni alcaloides. Esta variedad es empleada para la exportación, en los últimos años ha ido creciendo el volumen de exportación. Es ampliamente sembrado en los valles interandinos y quebradas de nuestra serranía. En la siguiente imagen se muestra la variedad usada en la investigación.



**Imagen 1.1:** Kiwicha de variedad Centenario

- ✓ **Oscar Blanco:** este grano es de color blanco y usado como hortaliza, investigada por el Ing. Oscar Blanco Galdós, y en honor a ello es que la variedad de kiwicha lleva su nombre, esta variedad es un producto muy importante en el procesado de expandidos tiene un rendimiento de hasta el 80%, en la actualidad este es el grano más usado a lo largo y ancho del país para la elaboración de expandidos de kiwicha. En la siguiente imagen se muestra de la variedad usada en la investigación.



**Imagen 1.2:** Kiwicha variedad Oscar Blanco

- ✓ **Chullpi:** Con granos de tipo reventón adecuados para cocción en seco.
- ✓ **Alan García:** Esta variedad tiene un tamaño de entre 0.8 – 1.5 metros y es susceptible a enfermedades y al ataque de plagas.
- ✓ **INIA414 - Taray:** Es una variedad desarrollada por el instituto nacional de Investigación y extensión agraria - INIA, para ser cultivada en los valles interandinos entre 1800 y 3100 msnm., con una producción promedio de 2.5 a 3.5 toneladas por hectárea, lo que le hace ideal para el procesamiento industrial y la preparación de harinas enriquecidas, granolas y snacks.
- ✓ **INIA 413 - Morocho Ayacuchano:** Esta variedad mejorada es ideal para la preparación de hojuelas. ([www.minag.gob.pe](http://www.minag.gob.pe)).

### **1.2.5 OTRAS VARIEDADES EN EL MUNDO**

- a. *Amaranthus caudatus* o Kiwicha: Su altura es generalmente de 1.5 a 2 metros, aunque a veces tienen una tonalidad oscura, las semillas son generalmente blancas o amarillentas. (Calvo *et al.*, 2001).

En la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco se han coleccionado distintas variedades de la especie para constituir un banco de

germoplasma que incluya variedades de Perú, Ecuador, Bolivia, y Argentina. Hasta el momento se han desarrollado dos variedades: Noel Vietmeyer y Oscar Blanco. (Calvo *et al.*, 2001).

- b. *Amaranthus cruentus*: Según los hallazgos realizados en México, se le ha venido cultivando desde hace más de 5000 años; crece también en otras zonas de América Central, como Guatemala. Las flores de la planta son generalmente verde amarillentas, o rojas; alcanza alturas de 1.5 a 2.2 metros. (Calvo *et al.*, 2001).
- c. *Amaranthus hypochondriacus*: Es la especie más común y de mayores rendimientos entre los *Amaranthus* originarios de México y América Central. Su altura esta entre 1.5 a 2.5 metros. La semilla generalmente es blanca. Esta especie se cultiva en Centro América, Nepal e India. (Calvo *et al.*, 2001).

#### **1.2.6 ALMACENAMIENTO DE LA KIWICHA**

La preservación y conservación de las cosechas de granos representan hoy en día una cuestión vital. Toda la reserva que se destina a la alimentación del agricultor y su familia debe ser cuidadosamente conservada durante el almacenamiento para que no se altere su valor nutritivo. Por lo tanto, el propósito del almacenamiento es preservar la calidad de los granos después de su cosecha. ([www.fao.org](http://www.fao.org)).

La producción de granos de kiwicha es discontinua y periódica mientras que su consumo es permanente y no se interrumpe. Para conciliar estos dos aspectos es necesario almacenar para atender la demanda que se presenta durante el periodo entre cosechas. Como raramente es posible consumir de inmediato

toda la producción, si el agricultor la almacena podrá consumirla poco a poco o venderla con posterioridad en la época más oportuna, evitando así las presiones del mercado que se presentan durante la época de la cosecha. (www.fao.org).

El deterioro del grano no se puede evitar completamente, ya que por ser un organismo vivo respira como cualquier otro, consumiendo sus reservas y produciendo energía. El contenido de humedad, la temperatura, los hongos, los insectos, las impurezas presentes en la masa de granos, los daños físicos y los roedores son factores que influyen en su conservación durante el almacenamiento. De estos factores, los principales que influyen en el deterioro de los granos son la temperatura y el contenido de humedad. En general, mientras más seco y frío se conserva el grano durante el almacenamiento, mayor será el periodo que permanecerá en buenas condiciones. (www.fao.org).

El almacenamiento de granos de kiwicha en la provincia de Andahuaylas se realiza en almacenes convencionales, estos ofrecen buenas condiciones para la conservación del producto por un período relativamente largo, siempre que se observen algunos requisitos operativos indispensables. Según la FAO un almacén tradicional tiene una vida útil media de 25 años. El almacenamiento se realiza envasándolos en sacos, se colocan en estibas o lotes individualizados, la operación del almacenamiento en sacos se manejan en volúmenes relativamente pequeños, la humedad relativa presente en estos recintos es de aproximadamente de 50 a 60% y las temperaturas oscilan entre 16 a 18 °C. Este tipo de almacenes sirve para almacenar toda clase de productos como maíz, frijol, arroz, trigo, soja, sorgo y café, así como otros productos no comestibles.

### 1.3. ISOTERMAS DE SORCIÓN

La isoterma de sorción se define como la relación entre la actividad de agua (o la humedad relativa de equilibrio de aire circundante) y el contenido de humedad de un material en equilibrio a temperatura constante, la cual se obtiene cuando el proceso de equilibrio parte de una muestra húmeda o seca, y a esta se le permite equilibrarse con la humedad del aire circundante perdiendo o ganando humedad, reflejando así, la forma como el agua se liga al sistema (Fuentes, 1996). La relación entre el contenido de agua y la actividad acuosa o la presión de vapor relativa es conocida como isoterma de sorción. (Badui, 1982).

Las características de sorción de los materiales alimentarios son esenciales para diseñar, modelar y optimizar muchos procesos tales como el secado, la aireación y el almacenamiento de alimentos. (Bala, 1997; Comaposada *et al.*, 2000; Trujillo *et al.*, 2003).

Su importancia para la ciencia de los alimentos se basa en la capacidad para predecir potenciales cambios en la estabilidad de los productos, a la vez de ser útiles para seleccionar empaques e ingredientes por predecir la humedad máxima a permitir durante el almacenamiento. (Madigan *et al.*, 2003).

La presencia y el estado del agua en un material son descritos por el contenido de agua en equilibrio y la actividad de agua de un alimento. Los fenómenos importantes en el procesamiento de alimentos están relacionados más a la actividad de agua que al contenido de agua. (Heldman y Lund, 2007).

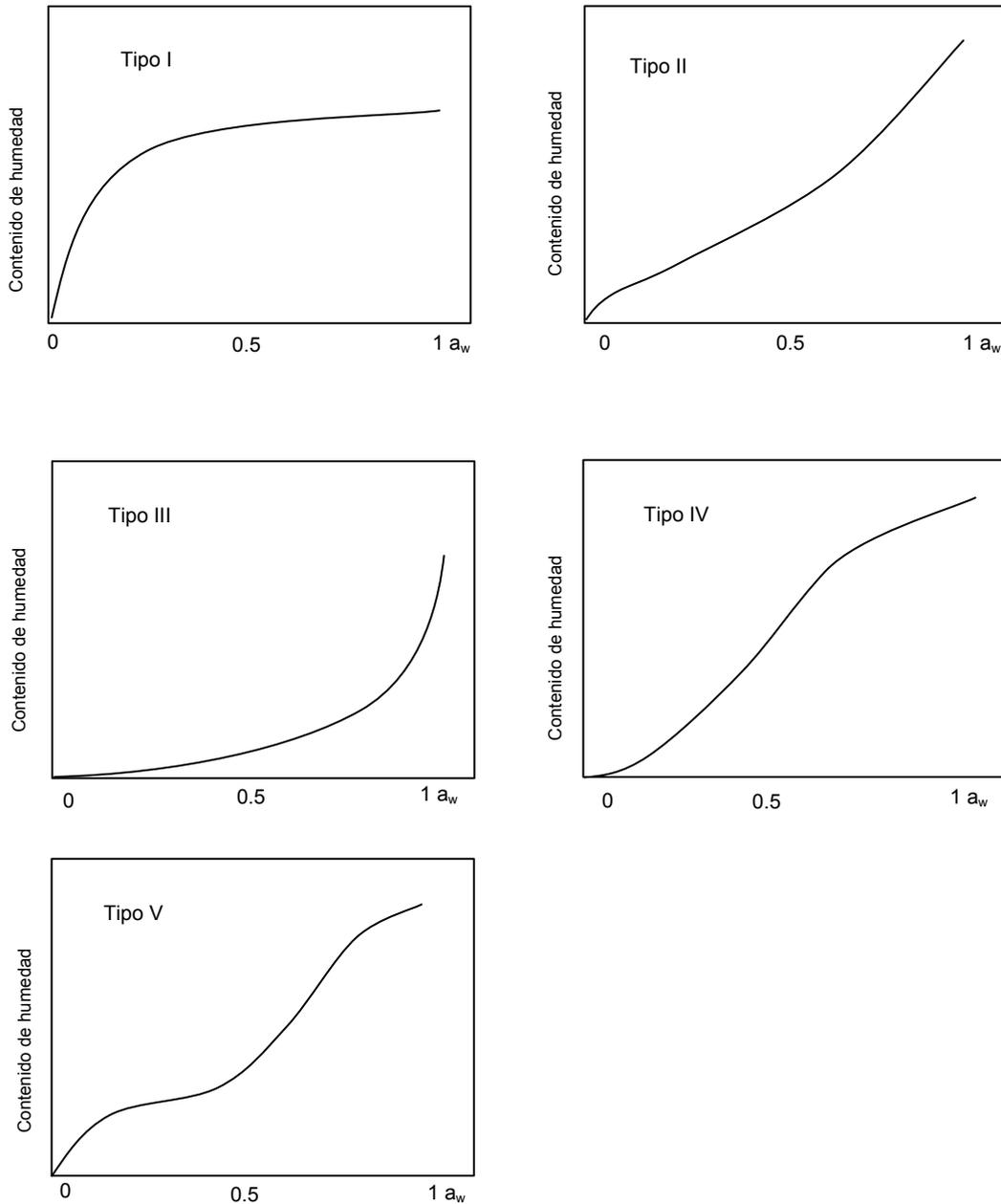
La adsorción de agua ocurre inicialmente por formación de una monocapa en la superficie del producto seguida de una adsorción en multicapa. La adsorción en multicapa de agua consiste en la captación de agua en los poros y espacios capilares, disolución de solutos, y finalmente en el atrapamiento mecánico de agua. Estas fases pueden traslaparse y difieren entre los distintos tipos de alimentos, dependiendo de su composición y estructura. (Barbosa, 1997).

Las isothermas de sorción de alimentos se construyen para conocer la actividad de agua de cada alimento a una determinada temperatura según su contenido en humedad. Una isoterma es la expresión de la relación funcional existente entre el contenido de humedad de un alimento (expresado como gramos de agua por 100 gramos de sólidos secos) y la actividad acuosa del mismo alimento. La isoterma se puede presentar en forma gráfica o bien en forma de ecuación. (Ramírez, 2012).

Existen diferentes tipos de isothermas de sorción en función del recubrimiento del adsorbente (capa monomolecular o multimolecular de adsorbato) dependiendo de la presencia de poros o capilares, mostrando todas ellas un cierto grado de histéresis (Hermida, 2000). En este momento la fase fluida posee una concentración de soluto  $C$ , mientras que en la fase sólida la cantidad de soluto por unidad de masa de adsorbente es  $m$ .

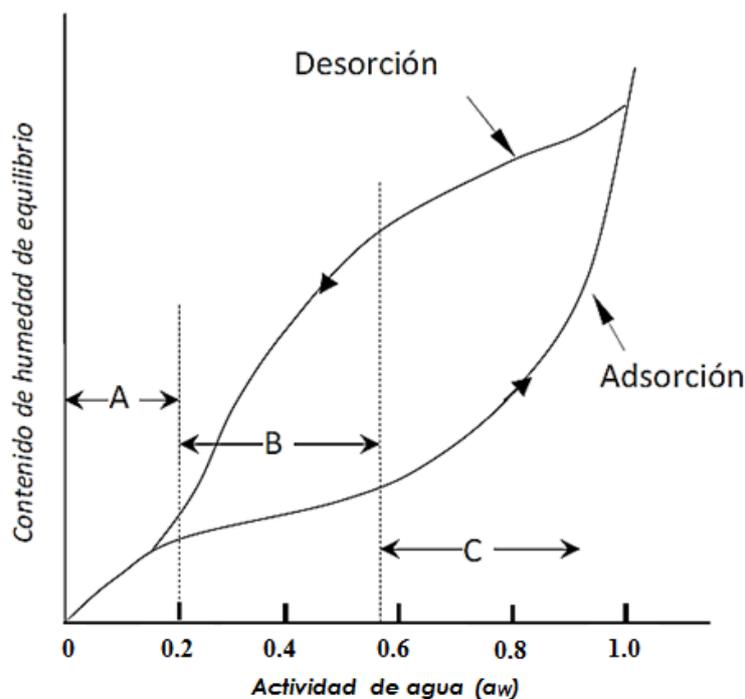
Tóth (2001), muestra cinco tipos de comportamiento de isothermas de adsorción (Figura 1.1). Shafiur (2003), si los alimentos contienen compuestos cristalinos hidrosolubles como azúcares o sales, la isoterma es cóncava del tipo III, la mayoría de los restantes alimentos tienen isothermas sigmoideas del tipo II, el punto de inflexión de la isoterma (tipo II) indica el cambio de la capacidad de

ligar agua o a las cantidades relativas de agua unida y libre. El tipo I es indicativo de un sólido poroso no hinchable, tal como los silicatos antiaglomerantes (“anticracking”).



**Figura 1.1:** Los 5 tipos de isothermas de adsorción de Van der Waals (Shafiur, 2003)

Las isothermas de los alimentos, se dividen en tres regiones (figura 1.2) denotadas por A, B y C. En la región A, las moléculas de agua están energéticamente ligadas a los sitios específicos en el sólido, estos sitios contienen a los grupos hidroxil de los polisacáridos, carbonil y amino de las proteínas, uniéndose a través de puentes de hidrogeno y fuerzas ión-dipolo. Es así que esta agua no está disponible como solvente y por lo tanto no colabora microbiológicamente, enzimáticamente o químicamente. A, esta zona se la denomina monocapa (Fellows, 2000). En la región B el agua se encuentra en multicapas (Brennan, 2008), menos fuertemente unida, estando presente normalmente en pequeños capilares (Shafiur, 2003) y en la región C se presenta estructuralmente y puede presentar soluciones (Brennan, 2008), suelta en grandes capilares o está libre (Shafiur, 2003).



**Figura 1.2:** Isothermas de adsorción y desorción e histéresis (Brennan, 2008)

Otra característica de las isothermas es su variación con respecto a la temperatura. En la generalidad de los casos, aumentando la temperatura, se representa una disminución en el contenido de humedad cuando la  $a_w$  permanece constante, la higroscopicidad del producto disminuye, es decir, el incremento en la temperatura repercute en un cambio descendente en la isoterma de sorción; lo que se puede apreciar como un acercamiento de la isoterma hacia el eje de  $a_w$ . (Fennema, 2000).

La isoterma de adsorción es la relación de equilibrio entre la concentración en la fase fluida y la concentración en las partículas de adsorbente a una temperatura determinada. Para el caso de gases la concentración viene generalmente dada como fracción molar o como presión parcial. Para líquidos la concentración se expresa habitualmente en unidades de masa, tales como partes por millón. La concentración de adsorbato sobre el sólido viene dada como masa adsorbida por unidad de masa de adsorbente original. (Mc. Cabe *et. al.*, 2007).

Para la elaboración de isothermas, el control de la actividad acuosa es la parte experimental de mayor importancia, es decir los medios generadores (sales) de humedad. De los factores que pueden influir en la obtención de una isoterma, tales como la historia, la composición y características del alimento, la higroscopicidad del material de construcción de la cámara, el espacio existente en la cámara y el área de exposición tanto de la muestra como del material de referencia, y la preparación de sal, la temperatura probablemente es uno de los más importantes a controlar. La temperatura afecta la movilidad de las moléculas de agua y el equilibrio dinámico entre el vapor y las fases

adsorbidas, un incremento en la temperatura determina una disminución en la higroscopicidad del alimento con excepción de ciertos azúcares y componentes alimenticios de bajo peso molecular. (Alvarado *et al.*, 2001).

### 1.3.1. MODELOS MATEMÁTICOS PARA ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Para la mayoría de los fines prácticos, la isoterma se presenta como un modelo matemático empírica o teórica. (Shafiur, 2003).

Fennema *et al.* 1975, mencionan que las isotermas se representan graficando la presión parcial de vapor ( $P_A$ ) en equilibrio con la concentración de sólidos de una sustancia ( $C_A$ ), a una temperatura constante, representada en una función (ecuación 1.1).

$$P_A = f(C_A), \quad T = \text{constante} \quad (1.1)$$

Existen varios modelos matemáticos empíricos y semi-empíricos, que se han propuesto para relacionar el contenido de humedad de equilibrio con la actividad de agua de un alimento.

Modelo de *GAB*: el modelo de *GAB* (Guggenheim-Anderson-de Boer) (ecuación 1.2. de la tabla 1.4.), es de amplio uso en alimentos (Shafiur, 2003) y es recomendada por el proyecto Europeo COST90, que trata sobre propiedades físicas en alimentos (Saravacos *et al.*, 1986), y muestra un amplio uso hasta valores de  $a_w$  0.94, esta ecuación está basada en la teoría de adsorción de *BET* (Brunauer – Emmet - Teller), la cual da una explicación física a los parámetros involucrados en ella. (Heldman y Lund, 2007).

La isoterma *GAB*, 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). Así, la isoterma de *GAB* y *BET*, presentan el parámetro de la monocapa  $X_m$ , que se define como la actividad del agua crítica (Shafiur, 2003). Cáceres (2002), observó que el parámetro  $X_m$  (monocapa) en el modelo *GAB*, presenta una dependencia lineal decreciente ( $R^2 = 0.9973$ ) para la uva deshidratada, para las isotermas a diferentes temperaturas.

Modelo de *BET*: Brunauer, Emmett y Teller, extienden el tratamiento de Langmuir, para explicar la adsorción multimolecular. Como consecuencia de la similitud entre las fuerzas responsables de la adsorción física y las fuerzas de licuefacción (fuerzas de van der Waals), la adsorción en las superficies tanto planas como convexas, no se limita a una monocapa sino que continua hasta que la superficie queda cubierta con una capa multimolecular de líquido. (Viades, 2008).

El modelo de *BET* es aplicable en el intervalo  $0.05 < a_w < 0.35-0.4$ , el intervalo de mayor interés en el área de los alimentos abarca desde  $a_w 0.1$  hasta 0.9, lo que representa una limitación importante en la aplicación de la isoterma *BET*. (Viades, 2008).

Modelo de Oswin: Es un modelo empírico que radica en el desarrollo de una serie de curvas de forma sigmoidea y fue desarrollado por Oswin en 1946. En la ecuación (1.4) que se muestra en la tabla (1.4) se observa que *A* y *B* son constantes. El modelo de Oswin fue utilizada para relacionar el contenido de

humedad de la leche en polvo sin grasa y el liofilizado de té hasta una actividad de agua de 0.5 (Oswin, 1946), así como para los distintos alimentos. (Andrade *et al.*, 2011).

Modelo de Henderson: Este modelo es comúnmente utilizado y puede ser expresado como se describe en ecuación (1.9) (tabla 1.4), donde  $k$  y  $n$  son constantes, de acuerdo a este modelo, una parte de  $\ln(\ln(1 - a_w))$  frente a  $\ln X_e$  debería dar como resultado una línea recta. Sin embargo, se observó tres isothermas que no proporcionaron información precisa sobre el estado físico del agua. (Andrade *et al.*, 2011).

Modelo de Halsey: Este modelo proporciona una expresión para la condensación de multicapas en una distancia relativamente grande de la superficie, suponiendo que la energía potencial de una molécula varía la  $n$ -ésima potencia inversa de su distancia desde la superficie. Este modelo es una buena representación de datos de adsorción respecto a isothermas de tipo I, II, o III. Por otra parte, el modelo de Halsey describe el comportamiento de sorción de los productos alimenticios que contienen almidón. Se describe como se muestra en la ecuación (1.8) (tabla 1.4). (Andrade *et al.*, 2011).

Modelo de Peleg: Este es un modelo puramente empírico, ecuación sin una base teórica. Presenta la misma o incluso una mejor adecuación que el modelo de GAB. Es un modelo de cuatro parámetros descrito en la ecuación (1.11), que se muestra en la tabla (1.4); donde  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , y  $d$  son constantes;  $c < 1$  y  $d > 1$ . Este no tiene una monocapa incorporado en ella. El modelo de Peleg describe adecuadamente la humedad de las isothermas de sorción en diferentes productos alimenticios. (Andrade *et al.*, 2011).

**Tabla 1.4:** Modelos matemáticos para ajuste de isotermas de adsorción, con dependencia e independencia de la temperatura.

Nombre del modelo	Modelo matemático	
GAB	$x_e = \frac{X_m C_{GAB} k_{GAB} a_W}{[(1 - k_{GAB} a_W)(1 - k_{GAB} a_W + C_{GAB} k_{GAB} a_W)]}$	(1.2)
BET	$x_e = \frac{X_m C_{BET} a_W}{[(1 - a_W)(1 + (C_{BET} - 1)a_W)]}$	(1.3)
Oswin	$x_e = A \left[ \frac{a_W}{1 - a_W} \right]^B$	(1.4)
Henderson modificado	$1 - a_W = \exp(-kTx_e^{n'})$	(1.5)
Chung y pfost	$a_W = \exp\left(\frac{A}{RT} \exp(-Bx_e)\right)$	(1.6)
Alan y shove	$x_e = a + b * a_W + c * a_W^2 + d * a_W^3$	(1.7)
Hasley	$a_W = \exp\left[\frac{-A}{x_e^B}\right]$	(1.8)
Henderson	$1 - a_W = \exp(-kx_e^n)$	(1.9)
Schuchmann ray y peleg	$x_e = \frac{A * a_W}{(1 + B * a_W) * (C - a_W)}$	(1.10)
Peleg	$x_e = A * a_W^c + B * a_W^d \quad c > 1 \text{ y } d > 1$	(1.11)
Caurie	$x_e = \exp\left[a_W \ln(r) - \frac{1}{4,5x_s}\right]$	(1.12)

Donde:  $A, B, C_{BET}, C, k_{GAB}, k, n, n', a, b, c, d$ =Constantes de las ecuaciones;  $X_e$ =Humedad de equilibrio expresada en base seca ( $g$  de agua/ $g$  masa seca);  $X_m$ =Humedad de la monocapa molecular ( $g$  de agua/ $g$  masa seca);  $R$ =constante universal de los gases ideales;  $T$ =Temperatura ( $^{\circ}K$ ),  $X_s$ =contenido de humedad de seguridad que proporciona la máxima estabilidad al alimento deshidratado durante el almacenamiento ( $Kg$  agua/ $Kg$  solido seco),  $r$  = constante característica del material.

### 1.3.2. SISTEMAS DE MEDICIÓN DE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

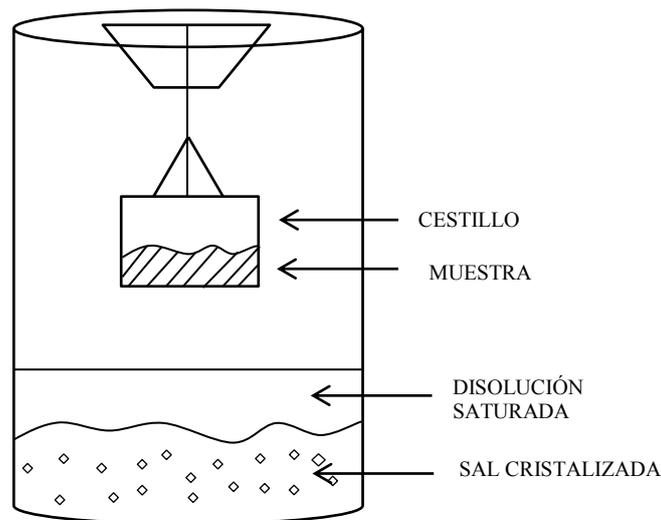
Los métodos higrométricos y gravimétricos son más frecuentes para la construcción de isothermas, sin embargo hay técnicas más sofisticadas que se están utilizando en algunos laboratorios para el mismo fin, pero son más costosas por el equipamiento e instrumentación requerida. (Alvarado *et al.*, 2001).

Los datos de equilibrio se pueden determinar utilizando dos técnicas diferentes:

- ✓ Técnicas manométricas o higrométricas, basadas en la determinación directa de la presión del vapor de agua o la humedad relativa de la interface de un sólido de contenido de humedad conocido.
- ✓ Técnicas gravimétricas, basadas en la determinación del contenido de humedad de la muestra después de que ésta ha alcanzado el equilibrio con un aire de humedad relativa conocida. Este procedimiento se puede desarrollar por métodos estáticos o dinámicos (Martínez *et al.*, 1998).

Las técnicas gravimétricas de método estático consisten en colocar dentro de una cámara herméticamente cerrada una disolución saturada de una sal con una  $a_w$  conocida (Figura 1.3). En el espacio libre que queda por encima de la disolución se origina un ambiente cuya humedad relativa en el equilibrio, a una temperatura determinada será exactamente la  $a_w$  de la sal a esa misma temperatura. Si en el interior de la cámara se coloca también la muestra, ésta irá ganando o perdiendo agua hasta quedar en equilibrio con el ambiente (peso constante). El equilibrio se considera en el momento en que la diferencia de peso de dos pesadas consecutivas es menor de  $1 \text{ mg/g}$  (Labuza *et al.*, 1985).

La  $a_w$  de la muestra en ese momento será la de equilibrio con la sal. Puesto que al estar saturada la solución de la sal, ésta absorbe las variaciones de humedad de manera que la humedad relativa del ambiente permanece constante. La humedad puede determinarse experimentalmente o calcularse conociendo la humedad inicial de la muestra, así como pesos inicial y final.



**Figura 1.3:** Método estático gravimétrico (Martínez *et al.*, 1998)

#### 1.4. ACTIVIDAD DE AGUA

La actividad del agua es un concepto que mide el grado de libertad y/o actividad o disponibilidad en que se encuentra el agua contenida en los alimentos. Las sustancias solubles del alimento, como los azúcares y sales son las sustancias que ligan o atan el agua del alimento, haciéndole menos libre o disponible para el desarrollo de los microorganismos (Huamán, 2001).

La actividad del agua ( $a_w$ ) es un concepto introducido por Lewis y Randall en 1923, el cual empezó a aplicarse a los sistemas biológicos (Scott, 1953). Aunque se dice que los primeros que mencionaron la actividad de agua fueron Mossel y Westerdijk en 1949, en el estudio que realizaron describiendo la

actividad de agua como característica del sustrato y como un factor esencial en el desarrollo de microorganismos en los alimentos (Multon, 1980).

Una actividad de agua ( $a_w$ ) será considerada segura si se demuestra por los mecanismos adecuados, para ello que a dicha  $a_w$  no hay desarrollo de microorganismos.

La  $a_w$  que es derivada de los principios fundamentales de termodinámica y física-química; se define como la razón de la presión parcial de vapor del agua ( $P$ ) de un alimento sobre la presión de vapor del agua pura ( $P_o$ ) a una temperatura dada (Labuza, 1980).

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 por tal motivo 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 (Fennema, 2000).

Si la humedad en el ambiente de un almacén excede el equilibrio de la humedad relativa ( $HRE$ ) del alimento, el alimento absorbe la humedad del ambiente y viceversa (Brennan, 2008). Hermida (2000), el equilibrio entre un sólido húmedo y aire con cierto contenido en agua, se establece cuando la actividad del agua es igual a la humedad relativa de equilibrio del aire. Al cociente  $p_m/p^v$  se le denomina actividad del agua ( $a_w$ ) y su valor se relaciona con determinados procesos de modificación o alteración de los productos alimentarios, es decir:

$$a_w = \frac{P_m}{P^v} = HRE = \frac{P_a}{P^v} \quad (1.13)$$

Donde  $p_m$ , presión de vapor de agua del alimento  $p^v$ , presión de vapor del agua pura y  $p_a$ , presión de vapor de agua de ambiente.

A temperatura constante y bajo condiciones de equilibrio, existe una única relación entre el contenido de humedad y la  $a_w$  (o la  $HRE$ ) de un alimento dependiendo de que el equilibrio se alcance por adsorción o por desorción (Casp y Abril, 2003).

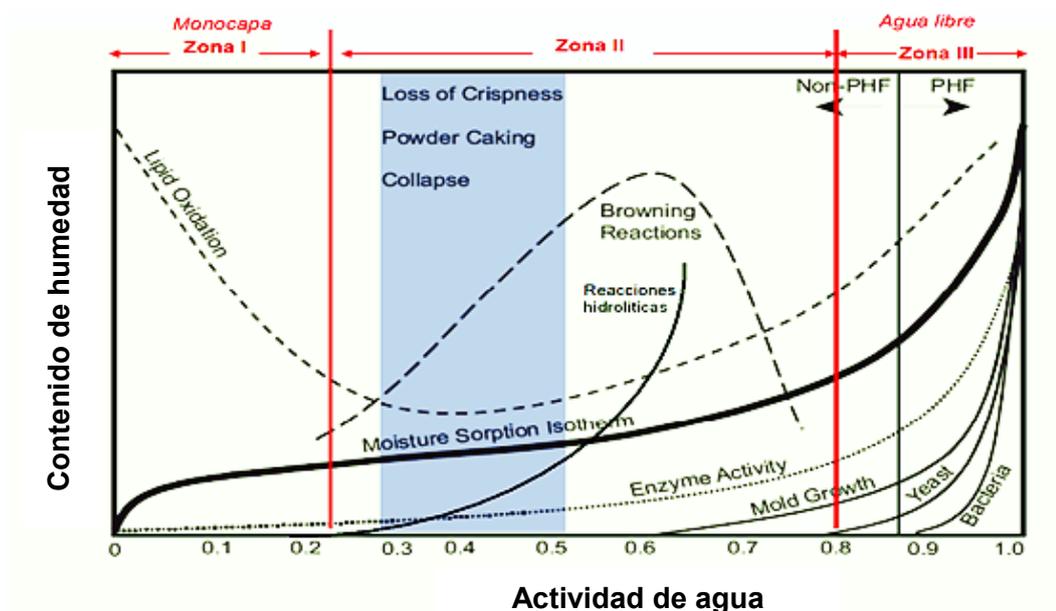
El agua en los alimentos no está uniformemente distribuida, en todo el alimento debido a: los complejos hidratados entre proteínas, carbohidratos, las diversas estructuras internas propias de cada tejido, y la incompatibilidad de los lípidos con el agua. Sin embargo la movilidad de todas estas sustancias se ve influenciada directamente por su porosidad, que en conjunto determinan la estabilidad del alimento (Huamán, 2001).

La actividad de agua está entre 0 y 1, siendo más baja mientras más fuertemente ligada se encuentre el agua al material; tiende a la unidad cuando está tan débilmente adherida al material que su comportamiento se acerca al de su estado libre o puro. En el secado las moléculas de agua menos ligadas son las primeras en retirarse y las últimas son las que están unidas fuertemente a las macromoléculas orgánicas del extracto seco por fuerzas de tipo electrostáticas (Orrego, 2003).

Por ello en los alimentos existen diferentes formas y grados energéticos de agua como son:

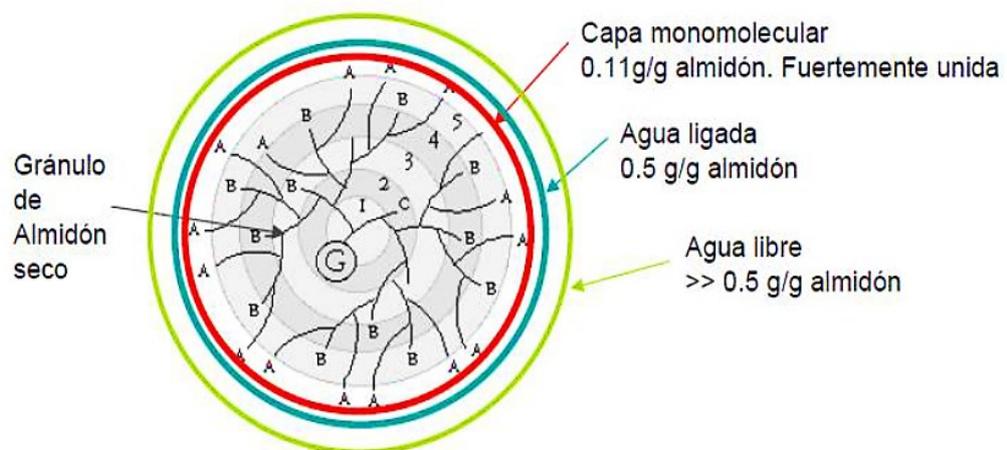
- ✓ Agua libre: de  $a_w > 0.6$ , agua congelable, que se volatiliza fácilmente por tratamiento térmico (secado), está fuertemente unida por puentes de hidrogeno.
- ✓ Agua Ligada: su  $a_w$  oscila entre  $0.2 < a_w < 0.6$ , agua que no se congela a  $-20\text{ °C}$ , cuyo contenido es mayoritario en productos secos, se encuentra en un estado “seudo-líquida”.
- ✓ Agua Ligada (monocapa), su  $a_w$  oscila entre  $0 < a_w < 0.2$  esta atrapa por una superficie viscosa por lo que no puede moverse ni difundirse (agua no disponible) y se encuentra sobre grandes moléculas polares. En esta región el agua prácticamente no se congela incluso a bajas temperaturas ( $-40\text{ °C}$ ).

En la siguiente figura (1.4) se muestra el Mapa de estabilidad de los alimentos en función de la  $a_w$ .



**Figura 1.4:** Mapa de estabilidad de los alimentos en función a la  $a_w$  (Labuza, 1970).

Para verificar este principio imagine un granulo de almidón totalmente seco, donde paulatinamente le vamos agregando agua, en una primera instancia 0.11 g de agua por cada gramo de almidón, vemos que se formara alrededor del granulo una superficie altamente viscosa, a esta región se le conoce con el agua de monocapa, ahora le agregaremos 0.5 g de agua, observaremos una zona de baja viscosidad pero las moléculas de agua están fuertemente unidas mediante puentes de hidrogeno que se le conoce como agua ligada, procedemos a añadir 0.5 g de agua adicionales y observaremos que la zona viscosa desaparece totalmente dejando al agua totalmente libre o disponible (ver Figura 1.5).



**Figura 1.5:** Esquema de los niveles de agua libre y agua ligada en un alimento (Labuza, 1970).

### 1.5. ALMACENAMIENTO DE GRANOS Y SEMILLAS

El elegir las condiciones más convenientes para el almacenamiento de cereales durante períodos prolongados, tiene una gran importancia económica; esto es mucho más acusado en las regiones en vías de desarrollo, donde es frecuente perder cerca del 30% de la cosecha (Cheftel y Cheftel. 2000).

Los granos, especialmente los cereales, son hoy la principal fuente de alimentación humana, constituyen cerca del 50 % del consumo per cápita a nivel mundial, el trigo, el arroz y el maíz son los productos que más se consumen (Ospina y Aldana, 1995).

## **A. FACTORES QUE ALTERAN LOS ALIMENTOS ALMACENADOS**

Para garantizar una buena preservación de los productos agrícolas hay que tener en cuenta que estos son seres vivos y que en ellos ocurren procesos fisiológicos, como el proceso respiratorio, en los cuales las moléculas al ser oxidadas por el oxígeno producen gas carbónico y agua y liberan energía (Dendy y Dobraszcyk, 2001). Asimismo, la acción de las lipasas y lipoxigenasas endógenas del grano, o la oxidación química de los lípidos, pueden provocar la formación de compuestos de sabor y olor desagradables (Cheftel y Cheftel, 2000). Estos factores son:

### **1. TEMPERATURA**

Independientemente de su efecto sobre los microorganismos, el frío y el calor no controlados pueden causar deterioro de los alimentos (Ospina y Aldana, 1995). El ritmo de las reacciones bioquímicas es función de la temperatura, de forma que a temperatura de almacenamiento más bajas, la alteración de los alimentos debida a daños de origen bioquímico se ralentiza, a la vez que disminuye el crecimiento de bacterias y mohos (Brennan, 2008). Cada especie bacteriana prolifera únicamente entre ciertos límites de temperatura y tiene para su desarrollo, una temperatura óptima.

**Tabla 1.5:** Tolerancia a la temperatura de los microorganismos

<b>Microorganismos</b>	<b>Temperatura de desarrollo</b>		
	Mínima	Optima	Máxima
Psicrófilos	-15	+10	+20 aprox.
Mesófilos	+5 a +10	+30 a +40	+50 aprox.
Termófilos	+40	+50 a +55	+65

Fuente:Cheftel y Cheftel. 2000.

## **2. HUMEDAD RELATIVA**

La humedad ambiente interviene sobre todo en la proliferación de microorganismos en la superficie de los productos alimenticios; pero no hay que olvidarse que varía en función de la temperatura y que por otra parte hay tendencia a establecerse un equilibrio entre la humedad relativa del ambiente y la actividad de agua del producto. Es por tanto un factor que no puede considerarse independientemente de los otros (Cheftel y Cheftel, 2000). En el caso ideal, la humedad de almacenamiento debería ser igual a la humedad relativa de equilibrio (*HRE*) del alimento (Brennan, 2008). Si la humedad del ambiente de almacenamiento excede la humedad relativa de equilibrio (*HRE*) del alimento, éste aumentará su humedad y viceversa.

## **3. ATMOSFERA AMBIENTE**

Además del vapor de agua, también intervienen otros gases de la atmósfera, tales como el oxígeno, nitrógeno y anhídrido carbónico, los cuales afectan a la flora bacteriana susceptible de alterar un alimento; la presión parcial del oxígeno influye sobre el potencial de oxi-reducción que tiene un alimento; sin embargo, el que más interviene sobre la flora de

alteración es el potencial del alimento, porque, por lo general, resulta poco afectado por las variaciones moderadas de la presión de oxígeno (Cheftel y Cheftel, 2000). Por ejemplo, en el café o en los productos de panadería, mientras que en otros casos puede ser necesario mantener una ventilación adecuada para impedir la fermentación anaeróbica, que puede dar lugar a la aparición de sabores extraños (Brennan, 2008).

## **B. MICROBIOLOGÍA DE LOS GRANOS**

Fueron los microbiólogos quienes primero demostraron que la  $a_w$ , más que la humedad, el parámetro que controla el crecimiento, la supervivencia, esporulación, muerte o producción de toxinas de los microorganismos (Mossel y Westerdijk, 1949), (Bryce y Pearce, 1946), (Scott, 1953, 1957). En el artículo clásico de Scott se reporta que la mayoría de bacterias no crecen en ambientes que tengan menos de 0.91 de actividad de agua; lo mismo ocurre para los hongos bajo 0.8 de  $a_w$ . Posteriormente otros investigadores encontraron resultados que indican que la actividad de agua modifica la sensibilidad de los microorganismos al calor, la luz y los productos químicos (Troller, 1973).

Dendy y Dobraszcyk (2001), el grano húmedo solo puede almacenarse un corto periodo de tiempo por dos razones:

- ✓ Los microorganismos presentes en el grano o sus esporas procedentes del aire circundante pueden crecer o alterarlo.
- ✓ En condiciones adecuadas de temperatura, el grano húmedo puede germinar.

## 1. HONGOS

La invasión de mohos se produce en condiciones húmedas, que se dan incluso cuando aparentemente el tiempo está en seco. Para su crecimiento, los hongos de campo generalmente requieren niveles de  $a_w$  superiores a 0.90, lo que equivale al 20- 25 % de humedad en el peso total del grano (ICMSF, 1998).

Cuando las condiciones de  $a_w$  favorecen el crecimiento, bacterias del genero *Bacillus* y mohos de varios géneros habitualmente son los únicos que se desarrollan (Jay, 2000), a valores mayores de  $a_w$  de 0.8 (Shafiur, 2003).

La mayoría de los mohos no pueden sobrevivir con un contenido de humedad en el grano inferior al 17 %; entre los que sobreviven se incluye la especie *Aspergillus candidus* que mata y cambia de color el germen.

Los mohos más peligrosos son los que pueden sobrevivir entre el 17-18 % de humedad incluyendo tres géneros muy importantes *Aspergillus*, *Fusarium* y *Penicillium*, pudiendo producir micotoxinas como se muestra en la tabla (1.6) (Dendy y Dobraszczyk, 2001).

Las levaduras osmófilas se desarrollan a valores de  $a_w$  comprendidos entre 0.65 a 0.60, mientras que los mohos xerófilos encuentran un buen desarrollo a  $a_w$  entre 0.75 a 0.65 (Fennema, 2000).

**Tabla 1.6:** Especies toxigénicas de mohos de almacén

<b>Especie</b>	<b>Micotoxina</b>
<i>Aspergillus flavus</i>	Aflatoxina
<i>Aspergillus niger</i>	Acido oxálico
<i>Aspergillus ochraceus</i>	Ocratoxinas
<i>Fusarium graminearum</i>	Zearalenona, tricotecenos
<i>Penicillium</i>	Citrina
<i>Penicillium verrucosum</i>	Ocratoxinas, citrina

Fuente: Dendy y Dobraszcyk, 2001.

En la tabla 1.7 Se muestran los hongos que comúnmente proliferan a condiciones de 25 a 30 °C de temperatura y la actividad de agua mínima que requiere para su crecimiento.

**Tabla 1.7:** Hongos comúnmente encontrados durante el almacenamiento de granos (25 a 30 °C) y  $a_w$  mínima de crecimiento.

<b>Hongo</b>	<b><math>a_w</math>, mínima</b>
<i>Aspergillus alophilicus</i>	0.68
<i>Aspergillus restrictus</i>	0.70
<i>Wallernia (Sporendonema) sebi</i>	0.70
<i>Aspergillus repens</i>	0.71
<i>Aspergillus glaucus</i>	0.73
<i>Aspergillus candidus</i>	0.80
<i>Aspergillus ochraceus</i>	0.80
<i>Penicillium citrinum</i>	0.80
<i>Aspergillus niger</i>	0.83
<i>Aspergillus flavus</i>	0.85

Fuente: Chirife, 1986.

## 2. BACTERIAS

Las bacterias que se encuentran en los cereales son fundamentalmente de las familias *Pseudomonadaceae*, *Micrococcaceae*, *Lactobacillaceae* y *Bacillaceae*. (Frazier 1976, citado por ICMSF 1998).

Las especies *Bacillus subtilis* y *Bacillus cereus* están presente en pequeño número, y *Staphylococcus aureus* o las especies de Salmonella no se han encontrado en varias revisiones de granos realizadas, mientras que la *S. aureus* puede crecer con  $a_w$  mayores a 0.86. (ICMSF, 1998), aunque no se ha encontrado en granos de cereales. (Shafiur, 2003).

### 1.6. CALOR ISOSTÉRICO DE ADSORCIÓN

Según Wang y Brennan (1991), para remover la humedad asociada a un material higroscópico, la energía necesaria es mayor que la utilizada para vaporizar igual cantidad de agua libre, en las mismas condiciones de presión y temperatura. Esta energía adicional, en virtud de las fuerzas de enlace entre el agua y la superficie de la sustancia adsorbente, se denomina calor isostérico de sorción, y es un buen parámetro que determina la cantidad mínima de calor requerido para remover una cantidad de agua de un producto.

El calor isostérico neto de adsorción ( $q_{st}$ ) se define como el calor total de adsorción de agua del alimento ( $\Delta H$ ) menos el calor de vaporización de agua pura ( $\Delta H_V$ ), a una determinada temperatura, y puede ser determinado por medio de la ecuación de Clausius-Clayperon (Heldman y Lund, 2007). De acuerdo a Iglesias y Chirife (1982), teóricamente, el calor isostérico de sorción

es idéntico al calor latente de vaporización del agua libre, y generalmente es considerado como un indicador de contenido de agua libre en el producto.

Iglesias y Chirife (1982), presentan un método largamente usado para calcular el calor isostérico de sorción, sea para los procesos de adsorción o para desorción, y está dado por la ecuación de Clausius-Clayperon:

$$q_{st} = -R \frac{d \ln a_w}{d(1/T)} \quad (1.14)$$

Integrando se obtiene:

$$\ln \frac{a_{w2}}{a_{w1}} \Big|_x = \frac{q_{st}}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (1.15)$$

Donde:

$a_w$  = actividad de agua, decimal;

$T$  = temperatura absoluta, K;

$q_{st}$  = calor isostérico neto de adsorción, kJ/kg; y

$R$  = constante universal de los gases, 8,314 kJ kmol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, siendo para el vapor de agua 0,4619 kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>.

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 alimentarios. A fin de conocer el estado del agua en los productos alimenticios, plantea una relación exponencial empírica entre el calor de sorción y el contenido de humedad de los alimentos deshidratados y frutas seca, que tiene la siguiente forma:

$$q_{st} = q_0 \exp(-X_e/X_0) \quad (1.16)$$

Donde:

$q_{st}$  = es el calor isostérico de adsorción neto, cuando el contenido de humedad es constante.

$X_e$  = es la humedad de equilibrio (*g de agua/g muestra seca (m. s.)*),  $q_0$  es el calor isostérico de adsorción (*kJ/mol*) de la primera molécula de agua en el alimento y se define cuando  $X_e \rightarrow 0 \Rightarrow q_{st} \rightarrow q_0$ , y  $X_0$  es el contenido de humedad característico para cada producto.

## 1.7. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, conservar alimentos se ha convertido en una práctica rutinaria que conlleva a fines económicos y para ello se aplican diferentes métodos y/o técnicas para poder aprovechar todos aquellos excedentes de producción, transformarlos, conservarlos y disponerlos en épocas de escasez. Una de las tendencias más importantes de los consumidores en el siglo XXI es hacia la imagen fresca y natural de los productos, es decir, alimentos que conserven al máximo sus características y atributos sensoriales y nutricionales.

Así mismo en el transporte se ha observado que estos medios no cuentan con las condiciones que se requiere, ya que están expuestos al medio y de esta forma existe una mayor probabilidad de deterioro y contaminación de los granos de kiwicha, mientras que durante su almacenamiento en un ambiente cerrado, estos locales están expuestos a humedades altas, proliferación de insectos, aparición de roedores y una serie de vectores que alteren la estabilidad de los granos; ocasionando así pérdidas económicas irreparables, en el año de 1993 la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación

y la Agricultura (FAO) realizó un estudio en donde un 30% de la post cosecha de granos y cereales se pierde por prácticas inadecuadas en el manejo y almacenamiento de granos.

El almacenamiento de granos de kiwicha es una etapa común para posteriores procesos de transformación, envasado en crudo, transporte en la exportación a granel, etc. Durante el periodo de almacenamiento y debido a su composición, los granos de kiwicha son susceptibles al deterioro, si se le maneja inadecuadamente, es decir en valores lejanos al de monocapa y en condiciones de humedad relativa muy variables.

Por lo que es recomendable que toda industria manufacturera de alimentos, en general y en particular de la industria dedicada a la transformación, transporte y almacenamiento de granos de kiwicha, conozca las isotermas de adsorción de humedad de cada uno de sus productos y de las materias primas utilizadas, para así reducir principalmente las pérdidas durante su almacenamiento.

Es importante mencionar que no se encontraron valores de humedad relativa y temperatura de almacenamiento más seguros a través de la evaluación de modelos matemáticos, ni valores de humedad de monocapa. Por lo tanto y con la idea de aportar esta información, como resultado de esta investigación se pretende dar a conocer las condiciones de almacenamiento a través de las isotermas de adsorción de la Kiwicha (*Amaranthus caudatus*), en sus variedades Oscar Blanco y Centenario, que serán de gran ayuda para la instalación o construcción de almacenes y el transporte de estos granos de kiwicha en la provincia de Andahuaylas, y de esta forma aportar con el desarrollo local mediante la investigación.

## 1.8. OBJETIVOS

### 1.8.1. Objetivo general

- ✓ Determinar las condiciones de temperatura y humedad relativa en el almacenamiento de dos variedades de granos de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) a través de isothermas de adsorción.

### 1.8.2. Objetivos específicos

- ✓ Evaluar la influencia de la temperatura en la humedad de equilibrio en el almacenamiento de granos de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) de las variedades Oscar Blanco y Centenario.
- ✓ Evaluar modelos matemáticos de isothermas de adsorción para los granos de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) de las variedades Oscar Blanco y Centenario, a las temperaturas de 18°C, 20°C, 25°C y 30°C.
- ✓ Determinar los parámetros fisicoquímicos  $X_m$ ,  $C_{GAB}$  y  $k_{GAB}$  del modelo GAB a las temperaturas de estudio, para los granos de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) de las variedades Oscar Blanco y Centenario.
- ✓ Determinar el calor isostérico de adsorción para los granos de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) de las variedades Oscar Blanco y Centenario.

## 1.9. PROBLEMA

¿En qué medida es posible determinar las condiciones de almacenamiento de los granos de kiwicha de las variedades de Oscar Blanco y Centenario, a través de las isothermas de adsorción?

## 1.10. HIPÓTESIS

### 1.10.1. Hipótesis general

- ✓ A través de las isotermas de adsorción es posible predecir las condiciones de almacenamiento de los granos de kiwicha de las variedades de Oscar Blanco y Centenario.

### 1.10.2 Hipótesis específicas

- ✓ La temperatura y humedad relativa influyen significativamente en el almacenamiento de granos de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) de las variedades Oscar Blanco y Centenario.
- ✓ Mediante los modelos matemáticos de isotermas de adsorción para los granos de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) de las variedades Oscar Blanco y Centenario, es posible evaluar las temperaturas en función de la humedad del medio para su almacenamiento.
- ✓ A través de los parámetros fisicoquímicos  $X_m$ ,  $C_{GAB}$  y  $k_{GAB}$  del modelo de GAB para los granos de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) de las variedades Oscar Blanco y Centenario, es posible evaluar el comportamiento termodinámico de adsorción durante su almacenamiento.
- ✓ El calor isostérico de adsorción, permite conocer el nivel de energía necesaria para evitar la adsorción por encima de la humedad crítica.

## CAPITULO II

### MATERIALES Y METODOLOGÍA

#### 2.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

Las pruebas experimentales se desarrollaron en el laboratorio de Química de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial (EPIA), de la Universidad Nacional José María Arguedas (UNAJMA) ubicada en el barrio de Santa Rosa Av. 28 de Julio N° 1103 del distrito de Talavera, provincia de Andahuaylas, región Apurímac.

#### 2.2. MATERIAL DE ESTUDIO

Para la investigación se tuvo como material de estudio, las 2 variedad de granos de kiwicha (Oscar Blanco y Centenario), los cuales fueron cosechados en el mes de junio del 2014, mes en el cual se cosecha y trilla los granos de kiwicha; fueron obtenidos del centro de investigación del Instituto Nacional de Investigación e Innovación Agraria (INIA) ubicado en la provincia de Huamanga, región de Ayacucho.

La estación experimental agraria Canaán, se encuentra ubicada en la V zona agro ecológica del país de 2000 m.s.n.m. hasta los 2800 m.s.n.m. entre la cordillera oriental y la cordillera occidental, presenta una temperatura que varía de 12 – 18 °C y la precipitación pluvial varía de 250 – 500 *mm*. Se caracteriza por ser una provincia de humedad semi – árida con aptitud agrícola, la estación se encuentra a una altitud de 2730 m.s.n.m., presenta una humedad relativa promedio de 56 % y presenta una temperatura promedio de 17.5 °C, se encuentra ubicado en la provincia de Huamanga, región de Ayacucho.

### **2.2.1. UNIVERSO Y/O POBLACIÓN**

El universo de estudio fue la Kiwicha (*Amaranthus caudatus*) de variedades Oscar Blanco y Centenario, la cantidad adquirida fue de 1 Kg por cada variedad, proporcionadas por el centro experimental del Instituto Nacional de Investigación e Innovación Agraria de Canaán-Ayacucho.

### **2.2.2. MUESTRA**

Para obtener una muestra representativa, se aplicó un muestreo no probabilístico por conveniencia, debido a que los granos de kiwicha deben presentar uniformidad, estar libres de rasgaduras, magulladuras y no estar resquebrajadas, una vez obtenido los granos con estas características se tomaron las muestras al azar, a fin de tener la unidad de análisis, cada muestra tenía un peso promedio de 1 g de granos de kiwicha, el total de muestras fueron de 8 por cada tratamiento más 2 réplicas incluidas, haciendo un total de 24 muestras.

## **2.3. EQUIPOS, MATERIALES, REACTIVOS E INSUMOS DE LABORATORIO**

### **2.3.1. Equipos**

- ✓ Incubadora.
- ✓ Balanza analítica.
- ✓ Agitador electromagnético.

### **2.3.2. Materiales**

- ✓ Vasos precipitados.
- ✓ Pizeta.
- ✓ Probeta.
- ✓ Bagueta.

- ✓ Papel de nitrocelulosa.
- ✓ Trípodes.
- ✓ Potes herméticos.
- ✓ Recipientes de polietileno.

### **2.3.3. Reactivos e insumos**

- ✓ Agua destilada.
- ✓ Cloruro de litio.
- ✓ Acetato de potasio.
- ✓ Cloruro de magnesio.
- ✓ Nitrato de magnesio.
- ✓ Yoduro de potasio.
- ✓ Cloruro de sodio.
- ✓ Cloruro de potasio.
- ✓ Cloruro de bario.

### **2.3.4. Materia prima**

- ✓ Kiwicha variedad Oscar Blanco.
- ✓ Kiwicha variedad Centenario.

## **2.4. METODOLOGÍA**

El trabajo de investigación, se desarrolló en el laboratorio de química de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional José María Arguedas. La materia prima utilizada fue la Kiwicha (*Amaranthus caudatus*) de las variedades Oscar Blanco y Centenario, que fueron adquiridas del Centro Experimental (INIA) de Canaán a fin de tener una semilla certificada. Las condiciones iniciales en que se trabajó en el laboratorio de química fueron

a una temperatura promedio de 18 °C y una humedad relativa de 55 %. Los granos de kiwicha de la variedad Oscar Blanco presenta una humedad de 9.5 % y variedad Centenario tiene una humedad de 8.6 %.

#### **2.4.1. CONSTRUCCIÓN DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN**

La construcción de las isotermas de adsorción, se basó en el método estático gravimétrico o método de control continuo de cambios de peso, descrito por Labuza, (1984).

Las isotermas de adsorción se evaluaron a las temperaturas de 18 °C, 20 °C, 25 °C y 30 °C, con el fin de evaluar la *HRE*. Las condiciones de humedad relativa, fueron obtenidas con la preparación de soluciones saturadas (de acuerdo al anexo 02), el procedimiento de este se muestra en el apartado 2.4.2. (Página 51) de este mismo capítulo. Se acondicionaron 08 potes de plástico de polietileno de alta densidad (*HDPE*) de 200 ml de capacidad con tapa de cierre hermético (Que cierra por completo una abertura, impidiendo el paso de cualquier cosa, incluso del aire a través de ella); las características del pote hermético que contiene la solución saturada es:

Ya que el pote de cierre hermético es un *HDPE*, este presenta una resistencia a agentes químicos como las bases (álcalis) y ácidos con una estabilidad buena, no es corroído por lixiviación de tóxicos, es inerte a su contenido (baja reactividad), es por ello que se emplea como contenedor de compuestos químicos. (www.oban.cl). Presenta una absorción de agua de 0.5 mg a 96 horas y una tasa de transferencia de vapor de agua (*WVTR*) de 125 g  $\mu\text{m}/\text{m}^2.\text{d}$  a 37.8 °C en 90 %*HRE* (Quintana, 2007). (Ver Anexo 3).

Cabe mencionar que la absorción de agua y la *WVTR* no se consideró para los cálculos de la humedad de equilibrio, debido a que representa una insignificante transferencia de vapor de agua desde el exterior de los potes herméticos hacia el interior de estos.

En el pote hermético se introdujeron los recipientes de polietileno (pote pequeño de plástico) que contenían a los granos de kiwicha, con un peso aproximado de 1 g por cada pote (el procedimiento se detalla en el apartado 2.4.3., de la página 52), a los potes de cierre hermético fueron colocados un trípode de acero inoxidable como soporte, en ellas se preparó una cama de papel de nitrocelulosa en las que fueron colocados los recipientes de polietileno. (Las imágenes de los procedimientos se encuentran en el anexo 4).

La experiencia se repite para las temperaturas de 18 °C, 20 °C, 25 °C y 30 °C, cada una por triplicado, a fin de tener resultados más consistentes, para cada una de las variedades de kiwicha (*Amaranthus caudatus*).

#### **2.4.2. PREPARACIÓN DE SOLUCIONES SATURADAS**

- ✓ Empleando un vaso de precipitado, se midió 60 ml de agua destilada, luego fue llevado al agitador termomagnético marca M6.
- ✓ El agitador termomagnético se encontraba a una temperatura de 30 °C ya que esta temperatura fue la primera en evaluarse y se agitó a 500 rpm.
- ✓ El vaso de precipitado fue llevado al agitador, luego se procedió a saturar el agua destilada con la sal en este caso se empezó con el cloruro de litio; la cantidad empleada de esta sal fue de 40 g.
- ✓ Una vez obtenida la solución saturada, se midió 10 ml que fueron vertidos en los potes herméticos.
- ✓ El mismo procedimiento fue realizado para las demás experiencias.

### 2.4.3. ACONDICIONAMIENTO DE LA MUESTRA

- ✓ Se tomó al azar muestras de 1 g aproximadamente de granos de Kiwicha (*Amaranthus caudatus*) de variedades Oscar Blanco y Centenario.
- ✓ Primero fue pesado el recipiente de polietileno en la balanza analítica marca OHAUS Adventurer modelo AR2140, luego empleando una cucharilla esterilizada, se procedió a verter los granos de kiwicha en el recipiente, el peso fue de aproximadamente 1 g.
- ✓ Luego de ser pesada la muestra, este se colocó en el trípode con la cama de papel de nitrocelulosa extendida sobre el trípode para evitar que la muestra cayera en la solución, la muestra fue colocada el pote con cierre hermético, después fue cerrado con su tapa correspondiente y finalmente rotulado con sus respectivos datos.
- ✓ Seguidamente fue trasladado a la incubadora que se encontraba a una temperatura de 30 °C, esta fue la primera temperatura a la que se trabajó.
- ✓ Las muestras de granos de kiwicha fueron pesadas cada tres días, para obtener diferencias significativas en cuanto al peso, para la variedad Oscar Blanco el peso constante fue alcanzado en 15 días, y para la variedad Centenario fue en 12 días. Se consideró un peso constante a la diferencia de 0.0006 g respecto al peso anterior.
- ✓ La misma experiencia fue realizada para las temperaturas de 25 °C, 20 °C y 18 °C.

La metodología empleada para la construcción de las isotermas de adsorción, preparación de soluciones saturadas y acondicionamiento de la muestra fue obtenida de: Martínez *et al.*, 1998 y Choque, 2009.

#### 2.4.4. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE EQUILIBRIO

La humedad de equilibrio ( $X_e$ ) fue calculada por la diferencia entre la masa de la muestra que presentó equilibrio y la masa seca, de acuerdo a la ecuación utilizada por (Soleimani *et al.*, 2006).

$$x_e = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad (2.1)$$

Donde:

$X_e$  = humedad de equilibrio en b. s.

$m_{eq}$  = masa de la muestra en el equilibrio, (g)., y

$m_s$  = masa de la muestra seca, (g).

#### 2.4.5. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA HUMEDAD DE EQUILIBRIO EN EL ALMACENAMIENTO

Se realizó a través del análisis de varianza de un factor – ANOVA, considerando la temperatura, como indicador de diferencia significativa para cada condición de almacenamiento.

El planteamiento de hipótesis estadística para el ANOVA de un factor fue:

**Hipótesis nula – $H_0$ :** No existe diferencia significativa entre humedades de equilibrio a las temperaturas de almacenamiento

$$x_{e,i} = x_{e,j}$$

**Hipótesis alterna – $H_A$ :** Existe diferencia significativa entre humedades de equilibrio a las temperaturas de almacenamiento

$$x_{e,i} \neq x_{e,j}, \text{ al menos dos de ellos.}$$

### **Nivel de significancia ( $\alpha$ )**

Para el caso de comparaciones de tratamientos habitualmente se emplea  $\alpha = 0.05$  (Gutiérrez y de la Vara, 2004).

### **Criterio de significancia**

Se rechaza  $H_0$  si  $\alpha > p\text{-value}$

## **2.4.6. MODELAMIENTO DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN**

Los datos experimentales se modelaron con las ecuaciones: *GAB* (Guggenheim, Anderson y de Boer), *BET* (Brunauer, Emmett y Teller), Henderson, Caurie, etc. las que se presentan en la tabla (1.4).

La calidad del ajuste de los modelos propuestos se evaluó por medio del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), 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 (Toloaba *et al.*, 2004) por medio de la siguiente ecuación:

$$(\%)E = \frac{100}{n} * \sum_{i=1}^n \frac{X_{ei} - X_{ci}}{X_{ei}} \quad (2.2)$$

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.

Para la resolución de las ecuaciones de los modelos matemáticos y para el cálculo de los diferentes parámetros se utilizó el programa Excel 2010.

#### 2.4.7. EVALUACIÓN DE LA MONOCAPA GAB

La monocapa  $X_m$ , se determinó, una vez ajustada la isoterma  $GAB$ , según la ecuación (1.2), para las temperaturas de 18 °C, 20 °C, 25 °C y 30 °C, a través de la prueba de los mínimos cuadrados, utilizando el paquete estadístico STATISTIC versión 5.1.

#### 2.4.8. DETERMINACIÓN DEL CALOR ISOSTÉRICO $q_{st}$

Las isotermas de adsorción se evaluaron a 18 °C, 20 °C, 25 °C y 30 °C. Experimentalmente para evaluar y obtener el valor de  $q_{st}$ , Se grafico  $\ln a_w$  vs  $1/T$ , a sus respectivas humedades de equilibrio, siendo la pendiente  $-q_{st}/R$  (Heldman y Lund, 2007).

Los valores del calor isostérico ( $q_{st}$ ), para cada contenido de humedad de equilibrio, fueron obtenidos a través de la ecuación:

$$\ln \frac{a_{w2}}{a_{w1}} = \frac{q_{st}}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (1.15)$$

Así mismo los valor de  $a_w$  y humedad de equilibrio fueron obtenidos a partir de la isoterma que presenta mejor ajuste y describe mejor a los datos experimentales (isoterma de adsorción), para el intervalo comprendido entre 0.05 a 0.25 de  $X_e$ . Por otra parte, los datos de  $q_{st}$  referidos a  $X_e$  correspondientes, se ajustaron a la ecuación de Tsami (ecuación 1.16), utilizando el software grafico Statistic versión 5.1.

**CAPITULO III**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**3.1. HUMEDAD DE EQUILIBRIO**

Los granos de kiwicha alcanzan la humedad de equilibrio a los 15 días en promedio para la variedad Oscar Blanco y 12 días en promedio para la variedad Centenario (la variación de peso se muestran en el anexo 03), los resultados de la  $X_e$  (humedad de equilibrio) se muestran en la tabla (3.1) y (3.2).

En la tabla (3.1), se aprecia que para todas las temperaturas, sucede un incremento de  $X_e$  para *HRE*. (humedades relativas) correspondientes a las sales LiCl,  $KC_2H_3O_2$ ,  $MgCl_2$ ,  $Mg(NO_3)_2$ , mientras que para el otro intervalo de *HRE* sucede una disminución de  $X_e$ , el mismo hecho sucede para la variedad Centenario tal como se muestra en la tabla (3.2).

**Tabla 3.1:** Humedad de equilibrio del grano de kiwicha de la variedad Oscar Blanco

Solución salina	18 °C		20 °C		25 °C		30 °C	
	<i>HRE</i>	$X_e^*$	<i>HRE</i>	$X_e^*$	<i>HRE.</i>	$X_e^*$	<i>HRE</i>	$X_e^*$
LiCl	0.1189	0.0741	0.1175	0.0756	0.1142	0.0760	0.1111	0.0764
$KC_2H_3O_2$	0.2537	0.0716	0.2487	0.0721	0.2367	0.0748	0.2257	0.0750
$MgCl_2$	0.3336	0.0843	0.3315	0.0849	0.3271	0.0862	0.3237	0.0889
$Mg(NO_3)_2$	0.5515	0.0945	0.5469	0.0965	0.5358	0.0950	0.5254	0.0961
KI	0.7039	0.1034	0.6997	0.1033	0.6896	0.1024	0.6799	0.1021
NaCl	0.7759	0.1165	0.7717	0.1185	0.7617	0.1168	0.7521	0.1154
KCl	0.8803	0.1521	0.8728	0.1534	0.8546	0.1462	0.8374	0.1423
$BaCl_2$	0.9086	0.2019	0.9095	0.1961	0.9122	0.1896	0.9155	0.1443

\*los resultados son promedios de pruebas triplicadas

**Tabla 3.2:** Humedad de equilibrio del grano de kiwicha de la variedad Centenario

Solución salina	18 °C		20 °C		25 °C		30 °C	
	<i>HRE</i>	$X_e^*$	<i>HRE</i>	$X_e^*$	<i>HRE</i>	$X_e^*$	<i>HRE</i>	$X_e^*$
LiCl	0.1189	0.0614	0.1175	0.0614	0.1142	0.0610	0.1111	0.0519
KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	0.2537	0.0575	0.2487	0.0587	0.2367	0.0634	0.2257	0.0521
MgCl <sub>2</sub>	0.3336	0.0710	0.3315	0.0728	0.3271	0.0763	0.3237	0.0694
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.5515	0.0855	0.5469	0.0875	0.5358	0.0850	0.5254	0.0860
KI	0.7039	0.0909	0.6997	0.0893	0.6896	0.0891	0.6799	0.0872
NaCl	0.7759	0.0999	0.7717	0.0996	0.7617	0.0992	0.7521	0.0953
KCl	0.8803	0.1351	0.8728	0.1351	0.8546	0.1348	0.8374	0.1263
BaCl <sub>2</sub>	0.9086	0.1821	0.9095	0.1817	0.9122	0.1814	0.9155	0.1786

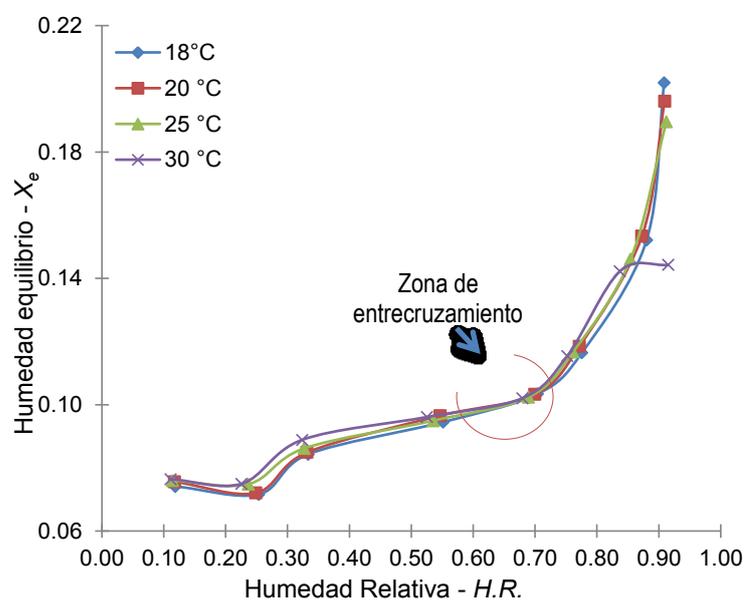
\*los resultados son promedios de pruebas triplicadas

En el primer intervalo, a *HRE* bajas existe mayor disponibilidad de absorber agua por parte de grano de kiwicha hasta su saturación (condición de equilibrio), mientras que en el segundo intervalo debido a las altas humedades del medio (*HRE*), el grano se satura con facilidad y esto está relacionado con la temperatura, hecho que sucede en las dos variedades de estudio

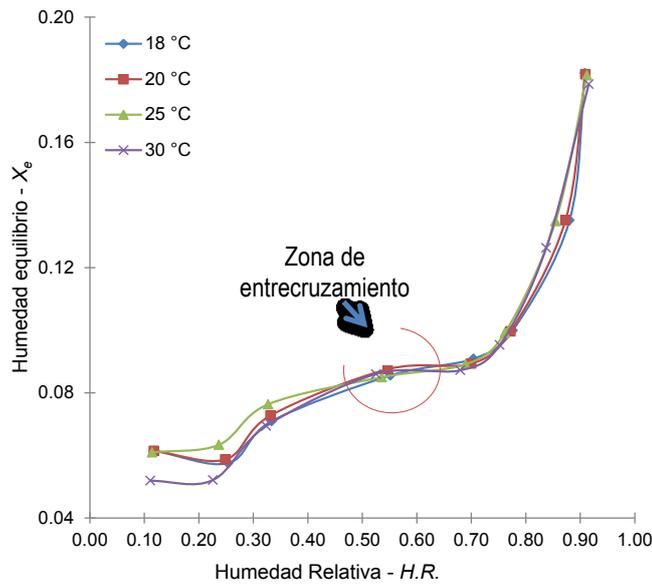
En la figura (3.1), se observa el comportamiento de la isoterma de adsorción de humedad del grano de kiwicha de la variedad Oscar Blanco para cada temperatura de estudio, se aprecia que ésta corresponde a una isoterma del tipo II, asimismo se puede ver que existe un entrecruzamiento de las isotermas a *HRE* de 0.68 o 68 %, mientras que para la variedad Centenario sucede a 0.55 o 55 % *HRE* (figura 3.2).

Shafiur (2003), manifiesta que el entrecruzamiento se debe a que en algunos alimentos una parte del soluto (sales y/o azúcar), está ligada a un polímero (almidón y proteína) y la otra parte es cristalina o amorfa. El hecho del

entrecruzamiento se puede deber a la composición de los granos, sobre todo en la superficie referidos a la fibra, grasas (como ceras) y carbohidratos. La desnaturalización de la proteína produce un desdoblamiento de la molécula exponiendo un mayor número de sitios polares disponibles para la unión de agua (Viades, 2008). Es así que la variedad Oscar Blanco presenta un contenido mayor de fibra de 5.04 % y 0.36 % de grasa, mientras que la variedad Centenario 3.26 % de fibra y 0.24 % (Chasquibol *et al.*, 1999), este hecho hace que el entrecruzamiento de la variedad Centenario suceda a menor *HRE* debido a que existe poca disposición de enlazar moléculas de agua hacia la fibra y grasa de la superficie externa del grano, lo que nos indica que el grano de la variedad Centenario presenta menores valores de  $a_w$  en comparación con la variedad Oscar Blanco.



**Figura 3.1:** Isotermas de adsorción del grano de kiwicha variedad Oscar Blanco



**Figura 3.2:** Isotermas de adsorción del grano de kiwicha variedad Centenario

### 3.2. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA HUMEDAD EQUILIBRIO

La evaluación de la influencia de la temperatura se realizó a través de un ANOVA de un factor que es la temperatura, los resultados se muestran en la tabla (3.3) y (3.4) para la variedad Oscar Blanco y Centenario respectivamente.

De la tabla (3.3) para la variedad Oscar Blanco, se concluye que la temperatura tiene efecto sobre  $X_e$ , es decir  $p\text{-value} < 0.05$  ( $F_{cal} > F_{crit}$ ), cualquier cambio de temperatura influenciará significativamente en la humedad de equilibrio y esta última está relacionada directamente con la actividad del agua a través de las isotermas de adsorción (figura 3.1).

El mismo hecho sucede para la variedad Centenario tabla (3.4), que presenta el mismo resultado que la primera variedad descrita anteriormente.

**Tabla 3.3:** ANOVA de la influencia de la temperatura para la variedad Oscar Blanco

Fuente de variabilidad	de	SC	gl	MC	Fcal	p-value*	Fcrit
Temperatura		8567.21	1	8567.21	765.32	1.37E-36	4.00
Dentro grupos	de	694.04	62	11.19			
Total		9261.25	63				

\*Evaluados a un nivel de significancia del 0.05

**Tabla 3.4:** ANOVA de la influencia de la temperatura para la variedad Centenario

Fuente de variabilidad	de	SC	gl	MC	Fcal	p-value*	Fcrit
Temperatura		8576.92	1	8567.21	766.18	1.33E-36	4.00
Dentro grupos	de	694.05	62	11.19			
Total		9270.97	63				

\*Evaluados a un nivel de significancia del 0.05.

### 3.3. MODELAMIENTO DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Se ha modelado el proceso de adsorción de los granos de kiwicha a través de modelos matemáticos propuestos en la tabla (1.4). Los resultados se muestran en las tablas (3.5) a (3.8). Según Gutiérrez y de la Vara (2004), el mejor método iterativo para la evaluación de un modelo matemático, está determinado: primero, por la menor diferencia mínima de cuadrados, y segundo, cuanto más alto sea el valor de  $R^2$  y Soleimani *et al.* (2006), consideran que tiene mejor ajuste aquel modelo que tiene un error medio relativo menor ( $E$ ) al 10 %, es decir que un modelo matemático se ajusta para todos los datos de un experimento y no sigue ningún patrón que conlleve a un error (Gutiérrez y de la Vara, 2004).

En el modelamiento de las isotermas de adsorción a 18 °C, se observa que el modelo de Alan y Shove se ajusta de mejor manera (tabla 3.5) a la variedad Oscar Blanco mientras que para la variedad Centenario el modelo de Peleg, ya que presentan mejores valores de  $E$  y  $R^2$ , asimismo los modelos de Halsey y GAB presentan ajustes considerables. La calidad de ajuste del modelo Alan y Shove, medido por  $E$  es de 7.26 % y un  $R^2$  de 0.9402 para el caso de la variedad Oscar Blanco, en el caso de la variedad Centenario el modelo de Peleg tiene un  $E$  de 4.86 % y  $R^2$  de 0.9855.

**Tabla 3.5:** Parámetros de las isotermas a la humedad de equilibrio de las 2 variedades de granos de kiwicha a la temperatura de 18 °C

Modelo		Variedad Oscar Blanco			Variedad Centenario		
		Parámetros	$E$ (%)	$R^2$	Parámetros	$E$ (%)	$R^2$
GAB	$X_m$	0.0541			0.0446		
	$C_{GAB}$	813366	11.22	0.8836	43546496	11.79	0.8936
	$K_{GAB}$	0.7662			0.7961		
BET	$X_m$	0.0211	40.19	0.1112	0.0187	38.58	0.3189
	$C_{BET}$	4303007			1504728		
Oswin	$A$	0.0941	11.27	0.8769	0.0801	11.08	0.8868
	$B$	0.2737			0.2993		
Henderson modificado	$n'$	2.4108	14.32	0.7852	2.1686	14.40	0.8027
	$k$	0.6218			0.5027		
Chung y Pfof	$A$	10.1371	11.54	0.8451	7.9896	12.26	0.8493
	$B$	27.4967			29.1016		
Alan y Shove	$a$	0.0399			0.0284		
	$b$	0.3483	7.26	0.9402	0.3250	9.16	0.9265
	$c$	-0.9179			-0.8329		
	$d$	0.7821			0.7057		
Halsey	$A$	0.0008	8.67	0.9227	0.0009	9.63	0.9264
	$B$	2.8122			2.6093		
Henderson	$n$	2.4109	14.32	0.7852	2.1688	14.40	0.8027
	$k$	181.06			146.395		
Schufman	$A$	435665			-0.0366		
	$B$	9015294	17.25	0.8129	-0.8456	9.53	0.9207
	$C$	1.1625			0.0436		
Peleg	$A$	0.0808			0.8622		
	$B$	0.0808	16.49	0.6494	0.1015	4.86	0.9855
	$c$	0.5875			24.3975		
	$d$	0.5875			0.3017		
Caurie	$r$	3.8817	13.66	0.8006	4.4484	13.55	0.8123
	$X_s$	13.6302			14.6615		

En el modelamiento de las isotermas de adsorción a 20 °C, se observa que el modelo de Alan y Shove se ajusta de mejor manera (tabla 3.6) a la variedad Centenario mientras que para la Variedad Oscar Blanco el modelo de Peleg, ya que presentan mejores valores de  $E$  y  $R^2$ , asimismo el modelo de Halsey y Schufman presentan ajustes considerables. La calidad de ajuste del modelo Alan y Shove, medido por  $E$  es de 8.93 % y un  $R^2$  de 0.9346 para la variedad Centenario, en el caso de la variedad Oscar Blanco el modelo de Peleg tiene un  $E$  de 3.88 % y  $R^2$  de 0.9870.

**Tabla 3.6:** Parámetros de las isotermas a la humedad de equilibrio de las 2 variedades de granos de kiwicha a la temperatura de 20 °C

Modelo		Variedad Oscar Blanco			Variedad Centenario		
		Parámetros	$E$ (%)	$R^2$	Parámetros	$E$ (%)	$R^2$
GAB	$X_m$	0.0560			0.0453		
	$C_{GAB}$	7.1342	22.94	0.5178	7100061	12.18	0.8937
	$K_{GAB}$	0.7521			0.7933		
BET	$X_m$	0.0219	40.27	-	0.0190	38.34	0.2807
	$C_{BET}$	661257			4865586		
Oswin	$A$	0.0958	9.75	0.8975	0.0812	11.24	0.8885
	$B$	0.2633			0.2954		
Henderson modificado	$n'$	2.5169	12.78	0.8062	2.2166	14.37	0.8008
	$k$	0.7589			0.5446		
Chung y Pfof	$A$	11.1177	10.33	0.8698	8.3169	11.96	0.8507
	$B$	28.1179			29.2413		
Alan y Shove	$a$	0.0449			0.0239		
	$b$	0.3092	6.41	0.9592	0.3721	8.93	0.9346
	$c$	-0.8165			-0.9357		
	$d$	0.7097			0.7702		
Halsey	$A$	0.0007	7.33	0.9430	0.0008	9.67	0.9299
	$B$	2.8955			2.6336		
Henderson	$n$	2.5169	12.78	0.8062	2.2166	14.37	0.8008
	$k$	222.46			159.6587		
Schufman	$A$	-0.0454			-0.0372		
	$B$	-0.8126	8.03	0.9411	-0.8430	10.03	0.9209
	$C$	0.0425			0.0422		
Peleg	$A$	0.2906			0.0730		
	$B$	0.1078	3.88	0.9870	0.0730	16.95	0.6693
	$c$	12.5320			0.6447		
	$d$	0.2062			0.6447		
Caurie	$r$	3.6962	12.18	0.8253	4.3227	13.47	0.8091
	$X_S$	13.4515			14.5347		

En el modelamiento de las isotermas de sorción a 25 °C, se observa que el modelo de Alan y Shove se ajusta mejor a los datos experimentales (tabla 3.7), ya que presenta mejores valores de  $E$  y  $R^2$  para las dos variedades, asimismo el modelo de Halsey presenta un ajuste considerable. La calidad de ajuste de este modelo Alan y Shove, medido por  $E$  es de 4.78 % y un  $R^2$  de 0.9756 para el caso del grano de kiwicha de la variedad Oscar Blanco, para la variedad Centenario, este tiene un  $E$  de 6.51 % y  $R^2$  de 0.9681.

**Tabla 3.7:** Parámetros de las isotermas a la humedad de equilibrio de las 2 variedades de granos de kiwicha a la temperatura de 25 °C

Modelo		Variedad Oscar Blanco			Variedad Centenario		
		Parámetros	$E$ (%)	$R^2$	Parámetros	$E$ (%)	$R^2$
GAB	$X_m$	0.0580			0.0465		
	$C_{GAB}$	1738173	9.34	0.9081	850239	11.94	0.5585
	$K_{GAB}$	0.7296			0.7896		
BET	$X_m$	0.0209	41.83	-	0.0193	38.66	0.1654
	$C_{BET}$	4501572			1981751		
Oswin	$A$	0.0970	9.32	0.9026	0.0833	11.50	0.8971
	$B$	0.2458			0.2884		
Henderson modificado	$n'$	2.7386	12.19	0.8049	2.2972	15.27	0.8005
	$k$	1.2280			0.6162		
Chung y Pfof	$A$	13.5268	9.24	0.8793	8.9352	11.76	0.8584
	$B$	29.9767			29.4450		
Alan y Shove	$a$	0.0464			0.0196		
	$b$	0.3069	4.78	0.9756	0.4341	6.51	0.9681
	$c$	-0.8014			-1.0847		
	$d$	0.6895			0.8709		
Halsey	$A$	0.0005	6.71	0.9517	0.0008	8.68	0.9428
	$B$	3.0902			2.6858		
Henderson	$n$	2.7387	12.27	0.8049	2.2971	15.28	0.8005
	$k$	360.05			183.6551		
Schufman	$A$	-0.0475			-0.0387		
	$B$	-0.7927	7.54	0.9461	-0.8372	10.13	0.9317
	$C$	0.0391			0.0391		
Peleg	$A$	1.8670			0.0727		
	$B$	-1.7125	14.76	0.6637	0.0727	17.63	0.6595
	$c$	0.5022			0.6050		
	$d$	0.5022			0.6050		
Caurie	$r$	3.3750	11.68	0.8271	4.1625	14.28	0.8098
	$X_s$	13.2012			14.3449		

En el modelamiento de las isotermas de adsorción para la temperatura de 30 °C, se observa que el modelo de Alan y Shove se ajusta de mejor manera (tabla 3.8) a la variedad Oscar Blanco mientras que para la variedad Centenario el modelo de Peleg, ya que presentan mejores valores de  $E$  y  $R^2$ , asimismo los modelos de Halsey, GAB y schufman, presentan ajustes considerables. La calidad de ajuste del modelo de Alan y Shove, medido por  $E$  es de 4.30 % y un  $R^2$  de 0.9565 para el caso del grano de kiwicha de la variedad Oscar Blanco, para la variedad Centenario, el modelo de Peleg tiene un  $E$  de 5.23 % y  $R^2$  de 0.9878.

**Tabla 3.8:** Parámetros de las isotermas a la humedad de equilibrio de las 2 variedades de granos de kiwicha a la temperatura de 30 °C

Modelo		Variedad Oscar Blanco			Variedad Centenario		
		Parámetros	$E$ (%)	$R^2$	Parámetros	$E$ (%)	$R^2$
GAB	$X_m$	0.0673			0.0423		
	$C_{GAB}$	648434	4.82	0.9443	1372938	9.80	0.9391
	$K_{GAB}$	0.5857			0.8181		
BET	$X_m$	0.0182	52.90	-	0.0185	39.60	0.2907
	$C_{BET}$	1414898			1758342		
Oswin	$A$	0.0980	5.55	0.9291	0.0779	10.22	0.9366
	$B$	0.1692			0.3174		
Henderson modificado	$n'$	3.9359	7.33	0.8853	2.0168	13.90	0.8580
	$k$	18.7553			0.3545		
Chung y Pfof	$A$	43.0926	5.29	0.9348	6.6929	11.21	0.8961
	$B$	42.3648			27.7282		
Alan y Shove	$a$	0.0680			0.0097		
	$b$	0.0765	4.30	0.9565	0.4252	8.38	0.9605
	$c$	-0.1358			-0.9978		
	$d$	0.1623			0.7940		
Halsey	$A$	1.668E-05	4.46	0.8878	0.0011	8.03	0.9655
	$B$	4.5247			2.4852		
Henderson	$n$	3.9360	7.33	0.8853	2.0169	13.90	0.8580
	$k$	5687.19			107.4695		
Schufman	$A$	2034.9			-0.0380		
	$B$	17689	4.82	0.9443	-0.8431	8.84	0.9475
	$C$	1.7078			0.0261		
Peleg	$A$	0.0678			0.2252		
	$B$	0.0678	10.07	0.7902	0.0981	5.23	0.9878
	$c$	0.3586			11.1910		
	$d$	0.3586			0.3262		
Caurie	$r$	2.3974	6.16	0.9182	5.0252	13.54	0.8580
	$X_s$	12.4243			15.1084		

El valor de la monocapa de GAB ( $X_m$ ) que se observan en las tablas (3.5), (3.6), (3.7) y (3.8) para el grano de kiwicha de la variedad Oscar Blanco, oscila entre 0.0541 a 0.0673 g H<sub>2</sub>O/g m.s. en los que se observa que el valor de la monocapa es directamente proporcional con la temperatura (relación lineal de  $X_m$  con la temperatura), es decir, a mayor temperatura mayor es el valor de  $X_m$ . Lara, *et al.* (2009), obtienen un valor de monocapa de GAB para la quinua (*Chenopodium quinoa* willd) que oscilan entre 0.073 a 0.032 g H<sub>2</sub>O/g m.s para un rango de temperatura de 20 a 60 °C. Choque, *et al.*, (2010), reportan valores de monocapa ( $X_{GAB}$ ) de quinua (*Chenopodium quinoa*) variedad blanco de Junín, que oscilan entre 0.037 a 0.031 g de agua de equilibrio/g m.s., para las temperaturas de 20 °C a 35°C. Choque, (2009), reporta valores de monocapa de GAB para el maíz morado (*Zea mays* L.) de 0.076, 0.068 y 0.064 g agua/g m.s. para las temperaturas de 18, 25 y 35 °C.

De acuerdo a lo citado anteriormente, los valores reportados por los distintos investigadores, hacen referencia a que la humedad de monocapa disminuye o tiende a decrecer con el aumento de la temperatura. Iglesias y Chirife, (1976a), hallaron que los valores de la monocapa decrecían significativamente al aumentar la temperatura después de estudiar 100 alimentos y componentes de alimentos, aunque no manifiestan que exista una relación lineal de  $X_m$  con la temperatura. Los valores obtenidos para el grano de kiwicha de la variedad Oscar Blanco tienen dicha relación, este hecho se puede deber a la topografía del grano, y a la afinidad de enlazarse, que tienen sus componentes monomoleculares para con las moléculas de agua; Potus, *et al.* (1992), menciona que el cereal durante el primer nivel de adsorción de agua; a bajas  $a_w$ , el agua forma una monocapa que se fija sobre grupos polares de alta energía de enlace (del tipo -CO, -COO<sup>-</sup> y -NH<sub>3</sub><sup>+</sup>) de

los constituyentes hidrofílicos (almidones, proteínas y pentosas) de los cereales, mediante atracciones electrostáticas, enlaces dipolares y enlaces de hidrógenos.

La presencia de poros y capilares en un determinado absorbente (en este caso el grano de kiwicha variedad Oscar Blanco), influye de manera significativa en la humedad de monocapa; un incremento en la temperatura determina una disminución en la higroscopicidad del alimento con excepción de ciertos azúcares y componentes alimenticios de bajo peso molecular (Alvarado, 2001). Lo que hace referencia a que el grano de kiwicha de variedad Oscar blanco tiene un mayor cantidad de poros en su superficie y que la capa lipídica (cubierta cerosa) no cubre herméticamente el grano, por lo cual se asume que hay una interconexión entre la superficie del grano con la estructura interna del grano y por ende hay una mayor posibilidad de enlaces con los componentes polares disponibles.

Mientras que en los granos de kiwicha de la variedad Centenario (tablas 3.5 a 3.8) la humedad de monocapa presenta valores de 0.0446, 0.0453, 0.0465 y 0.0423 g H<sub>2</sub>O/g m.s, para las temperaturas de 18, 20, 25 y 30 °C respectivamente, se observa que tiende a aumentar hasta los 25 °C, pero para la temperatura de 30 °C este valor es mucho menor, lo que indica que  $X_m$  desciende debido a que a una mayor temperatura la monocapa se condensa de la superficie del grano, ya que presenta menor cantidad de compuestos polares disponibles para enlazarse y puede que también sea por el tipo de enlace que haya sucedido entre el adsorbente y las moléculas de agua.

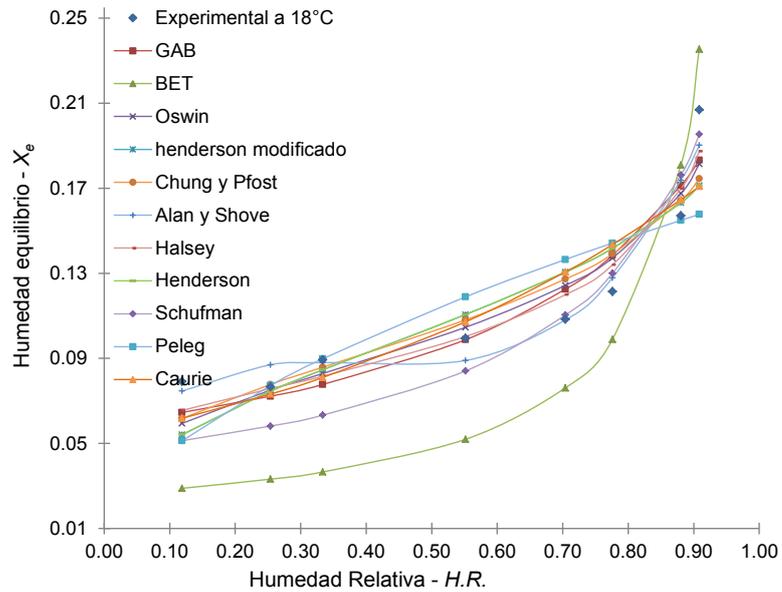
La ecuación *BET* es aplicable en el intervalo  $0.05 < a_w < 0.35 - 0.4$ , el intervalo de mayor interés en el área de los alimentos abarca desde  $a_w$  0.1 hasta 0.9, lo que representa una limitación importante en la aplicación de la isoterma *BET*. El valor

de la cantidad adsorbida a presiones relativas mayores a 0.4, con frecuencia es menor que el predicho por la isoterma *BET*, se han propuesto tres razones para explicar este hecho: *i)* La energía de adsorción en la segunda capa es menor que la energía de licuefacción del adsorbato, *ii)* La estructura del adsorbente es tal que permite solamente la adsorción de un número finito de capas y *iii)* A causa de los efectos de condensación capilar. (Viades, 2008)

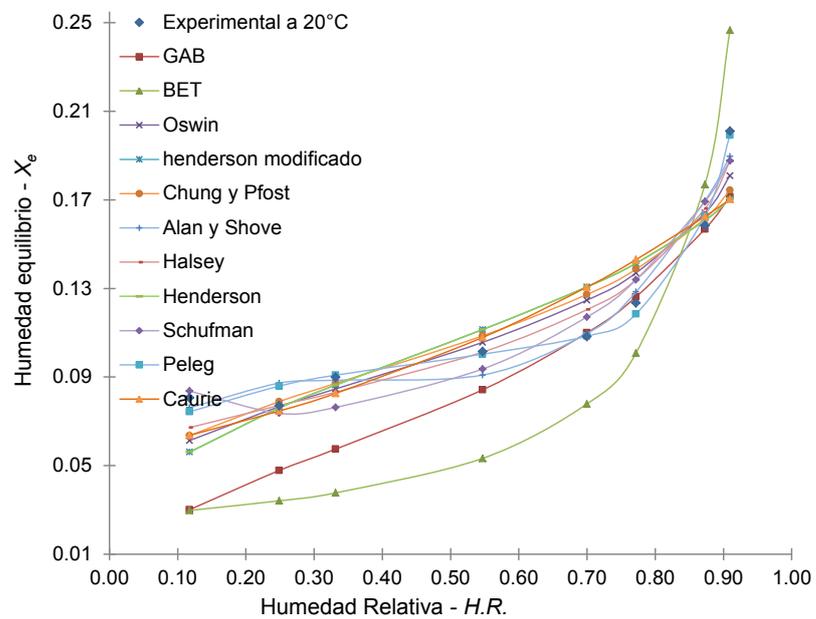
La isoterma *BET* considera solamente la diferencia de energía entre las moléculas en la monocapa y las de las capas siguientes a las que le asigna un comportamiento líquido.

En las figuras (3.3, 3.4, 3.5 y 3.6) se muestra el ajuste de los distintos modelos matemáticos a las temperaturas de 18, 20, 25 y 30 °C, para los granos de Kiwicha de la variedad Oscar Blanco.

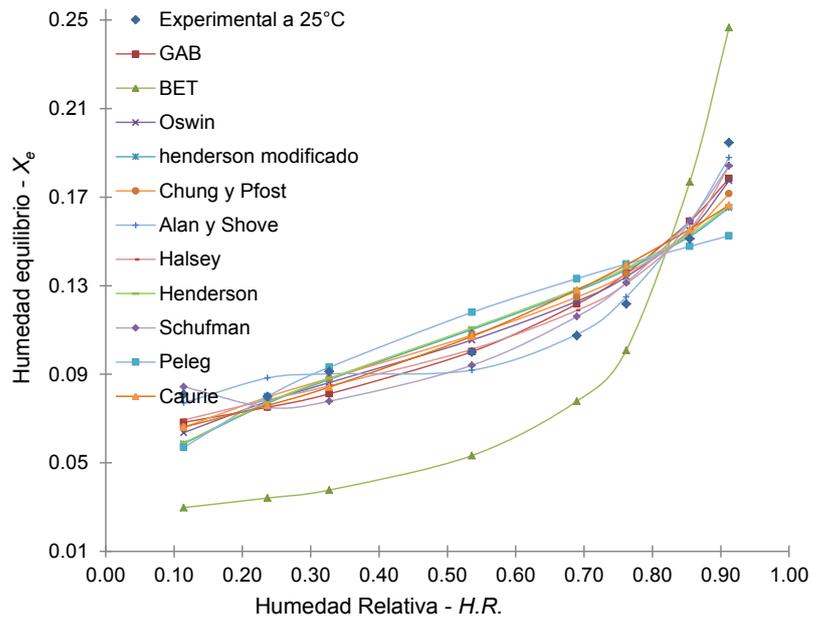
Las figuras (3.7, 3.8, 3.9 y 3.10) también muestran el ajuste realizado de los distintos modelos matemáticos a la isoterma experimental a las temperaturas de 18, 20, 25 y 30 °C, para el grano de kiwicha de la variedad Centenario.



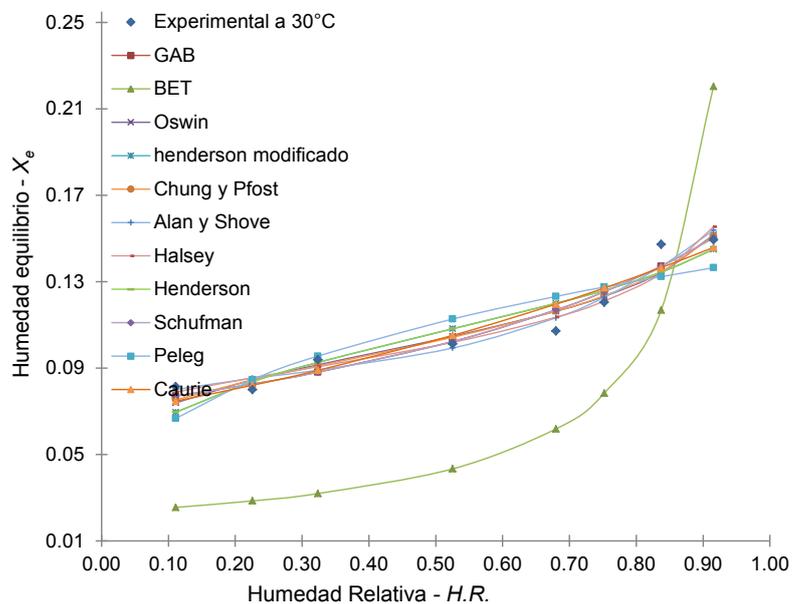
**Figura 3.3:** Isotermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 18 °C, para los granos de kiwicha variedad Oscar Blanco.



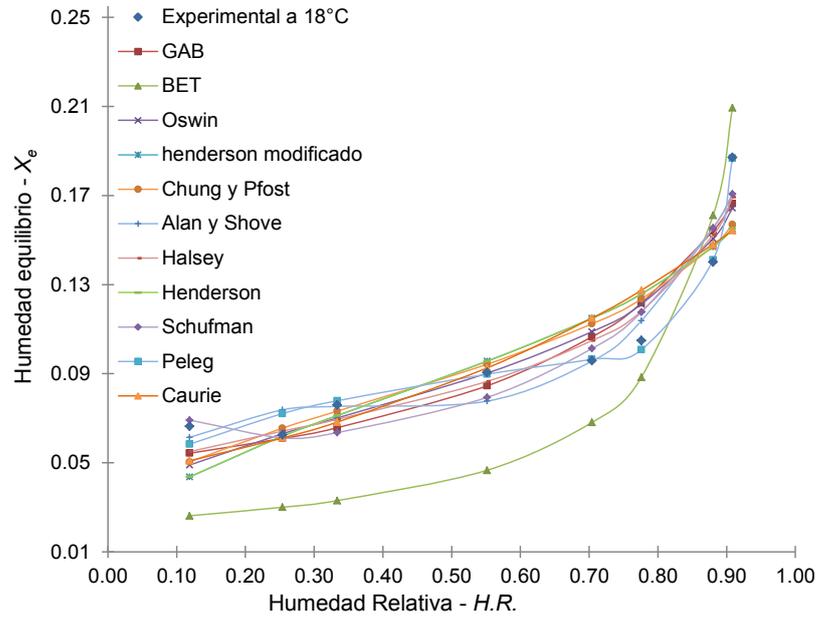
**Figura 3.4:** Isotermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 20 °C, para los granos de kiwicha variedad Oscar Blanco.



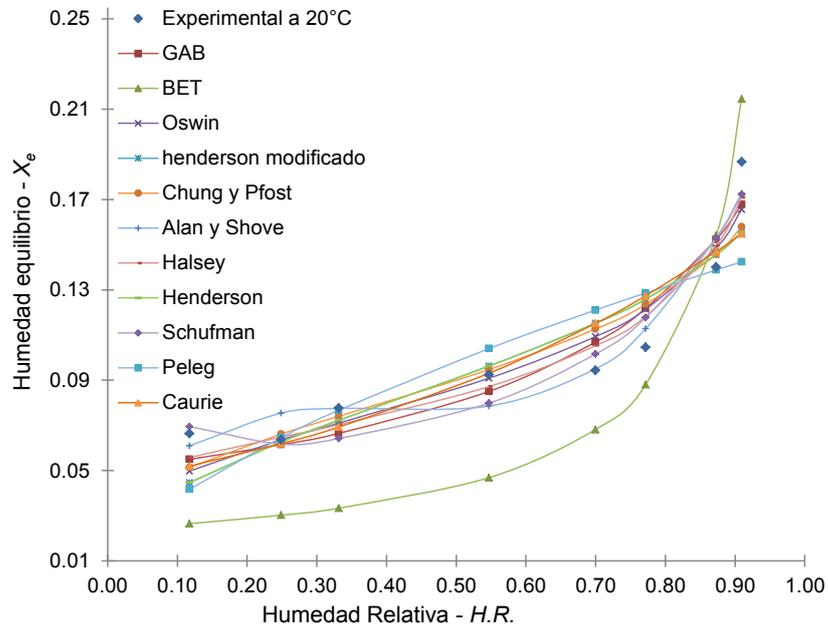
**Figura 3.5:** Isothermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 25 °C, para los granos de kiwicha variedad Oscar Blanco.



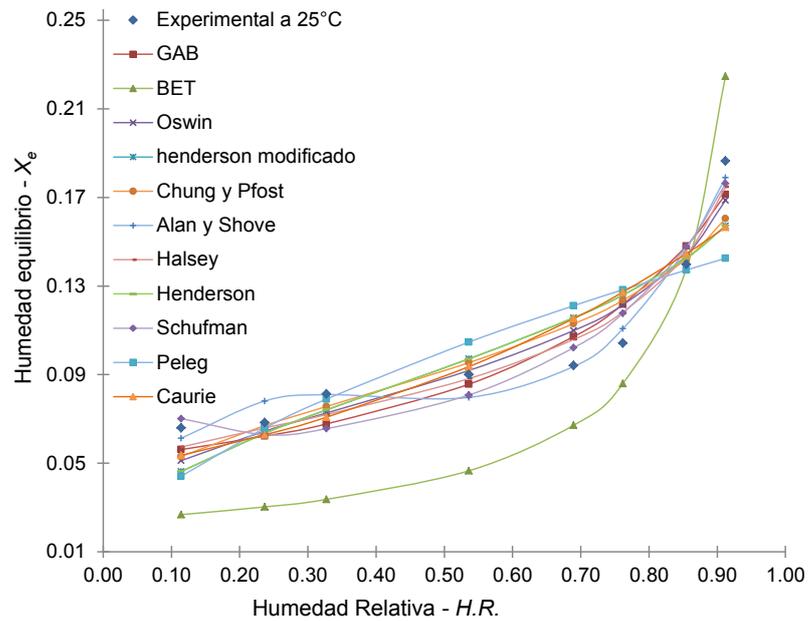
**Figura 3.6:** Isothermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 30 °C, para los granos de kiwicha variedad Oscar Blanco.



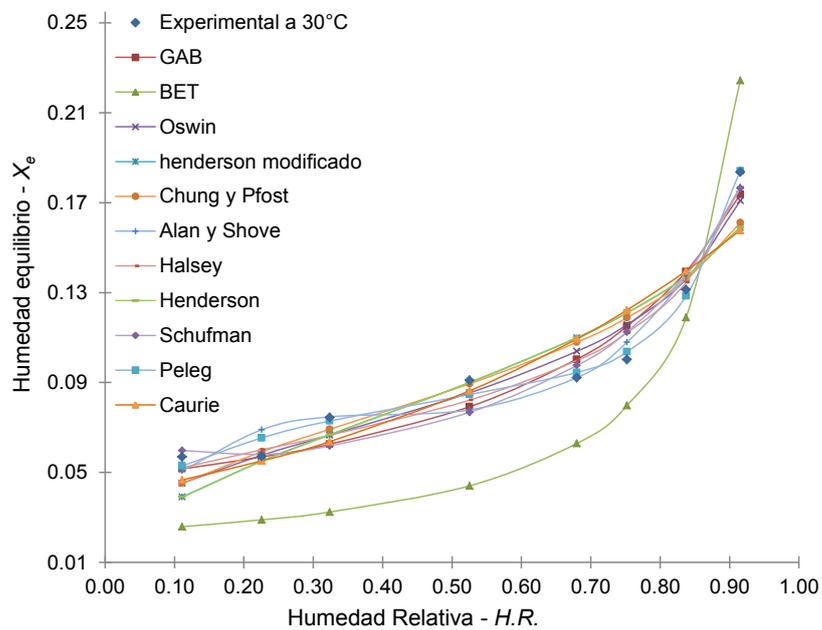
**Figura 3.7:** Isotermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 18 °C, para los granos de kiwicha variedad Centenario.



**Figura 3.8:** Isotermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 20 °C, para los granos de kiwicha variedad Centenario.

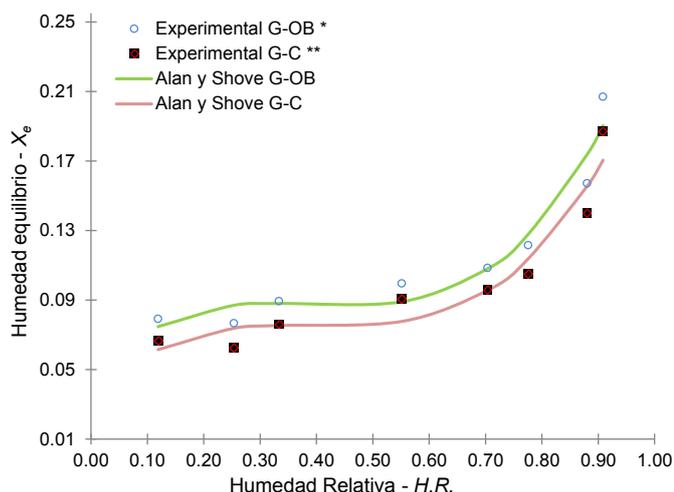


**Figura 3.9:** Isothermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 25 °C, para los granos de kiwicha variedad Centenario.



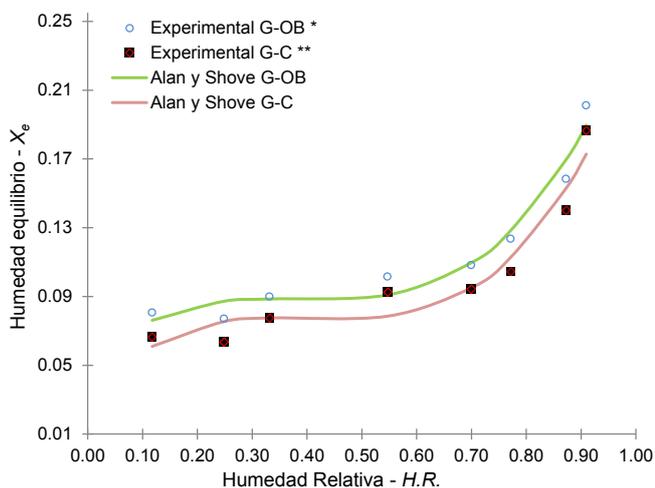
**Figura 3.10:** Isothermas de adsorción ajustadas a los diferentes modelos matemáticos (tabla 1.4) a 30 °C, para los granos de kiwicha variedad Centenario.

En las figuras (3.11 a 3.14), se muestra el modelo matemático que mejor se ajusta y describe a la isoterma experimental en este caso el modelo de Alan y Shove, a las temperaturas de 18, 20, 25 y 30 °C para los granos de kiwicha de la variedad Oscar Blanco y Centenario.



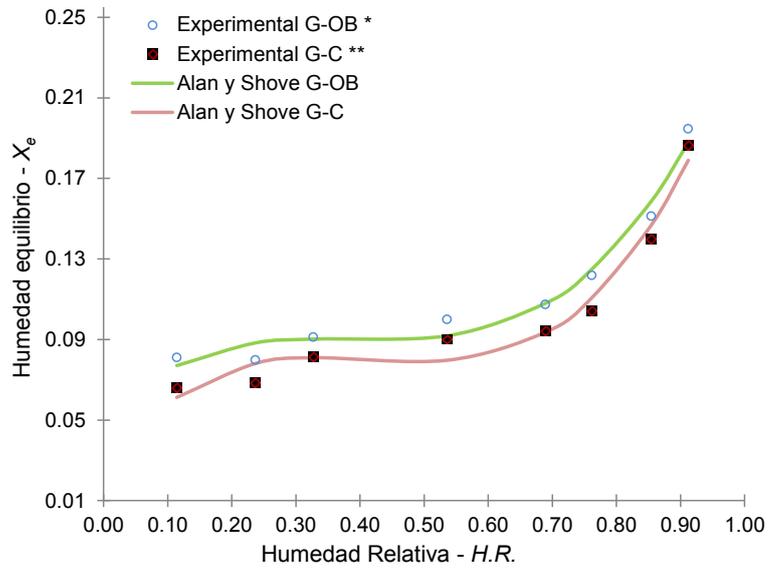
G-OB\* Grano de kiwicha variedad Oscar Blanco; G-C\*\* Grano de kiwicha variedad Centenario

**Figura 3.11:** Isothermas de adsorción ajustadas al modelo de Alan y Shove a 18 °C, para los granos de kiwicha de la variedad Oscar Blanco y Centenario.



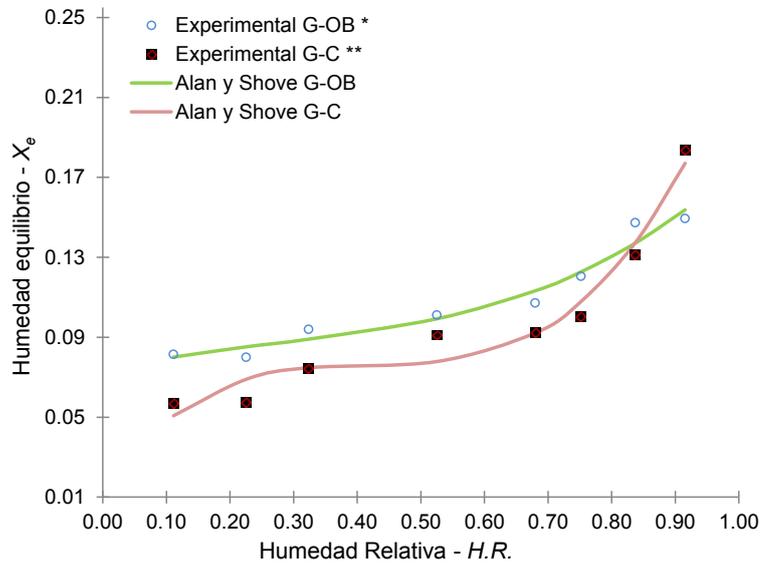
G-OB\* Grano de kiwicha variedad Oscar Blanco; G-C\*\* Grano de kiwicha variedad Centenario

**Figura 3.12:** Isothermas de adsorción ajustadas al modelo de Alan y Shove a 20 °C, para los granos de kiwicha de la variedad Oscar Blanco y Centenario.



G-OB\* Grano de kiwicha variedad Oscar Blanco; G-C\*\* Grano de kiwicha variedad Centenario

**Figura 3.13:** Isotermas de adsorción ajustadas al modelo de Alan y Shove a 25 °C, para los granos de kiwicha de la variedad Oscar Blanco y Centenario.



G-OB\* Grano de kiwicha variedad Oscar Blanco; G-C\*\* Grano de kiwicha variedad Centenario

**Figura 3.14:** Isotermas de adsorción ajustadas al modelo de Alan y Shove a 30 °C, para los granos de kiwicha de la variedad Oscar Blanco y Centenario.

### 3.4. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LA ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE GAB

En la tabla 3.9 se muestran los parámetros fisicoquímicos de la isoterma de GAB ( $X_m$ ,  $C_{GAB}$  y  $k_{GAB}$ ), cabe mencionar que  $C_{GAB}$  es la constante de Guggenheim,  $k$  una constante correctiva que describe las propiedades de adsorción de agua más allá de la monocapa y  $X_m$  es la ganancia del agua en la monocapa (g/100 g la materia seca). Los 3 parámetros ( $X_m$ ,  $C_{GAB}$  y  $k_{GAB}$ ) caracterizan las interacciones del agua con los macroconstituyentes del alimento (Bell y Labuza, 2000).

**Tabla 3.9:** Parámetros fisicoquímicos de la isoterma de adsorción de GAB

Modelo	Variedad Oscar Blanco		Variedad Centenario		
	Parámetros	Temperatura	Parámetros	Temperatura	
GAB	$X_m$	0.0541		0.0446	
	$C_{GAB}$	813366	18 °C	43546496	18 °C
	$k_{GAB}$	0.7662		0.7961	
GAB	$X_m$	0.0560		0.0453	
	$C_{GAB}$	7.1342	20 °C	7100061	20 °C
	$k_{GAB}$	0.7521		0.7933	
GAB	$X_m$	0.0580		0.0465	
	$C_{GAB}$	1738173	25 °C	850239	25 °C
	$k_{GAB}$	0.7296		0.7896	
GAB	$X_m$	0.0673		0.0423	
	$C_{GAB}$	648434	30 °C	1372938	30 °C
	$k_{GAB}$	0.5857		0.8181	

Las constantes  $C_{GAB}$  (constante energética) y  $k_{GAB}$  están relacionadas a la energía de interacción entre la primera capa de moléculas (monocapa) y las capas distantes de moléculas de agua adsorbidas (comportamiento líquido). Las mismas dependen de la temperatura y dicha dependencia puede ser expresada por una ecuación del tipo de Arrhenius (García *et al.*, 2000). Prieto *et al.* (2006), menciona

que  $C_{GAB}$  es una constante,  $k$  una constante correctiva que describe las propiedades de adsorción de agua más allá de la monocapa.

Según Zug (2002b), señala que, cuando  $C_{GAB} > 1$ , la adsorción en la primera capa está fuertemente favorecida con relación a las capas más altas, por lo que la primera capa casi se llena completamente antes que comience en las capas superiores. En la tabla (3.9), se puede observar que  $C_{GAB}$  es mayor a la unidad en las 4 temperaturas para el caso de los granos de kiwicha de la variedad Oscar Blanco, por lo tanto la adsorción de la capa monomolecular es rápida, ocupando así los poros y por ende los enlaces del tipo (del tipo  $-CO$ ,  $-COO^-$  y  $-NH_3^+$ ) mediante atracciones electrostáticas, enlaces dipolares y enlaces de hidrógenos, que se encuentran disponibles en los diferentes constituyentes del grano en toda la superficie de este.

En el caso del grano de kiwicha variedad Centenario, este presenta el mismo caso, ya que  $C_{GAB}$  es mayor a 1 la humedad de monocapa logra cubrir la mayor cantidad de enlaces disponibles en toda la superficie del grano, dando lugar a que se forme en menor tiempo las capas siguientes.

El parámetro  $k$ , conocida como la tercera constante, mide la diferencia de potencial químico estándar entre las moléculas de la segunda etapa y aquellas del estado líquido puro. Si  $k$  es menor a la unidad, se estimará una adsorción menor a la predicha por *BET* (Zug, 2002a), en la tabla (3.9) se observa que  $k$  es menor a la unidad para las 2 variedades de granos de kiwicha, lo que indica que existe una menor adsorción para la isoterma de *BET* (tabla 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8).

Brunauer, Emmett y Teller, extienden el tratamiento de Langmuir, para explicar la adsorción multimolecular. Como consecuencia de la similitud entre las fuerzas

responsables de la adsorción física y las fuerzas de licuefacción (fuerzas de van der Waals), la adsorción en las superficies tanto planas como convexas, no se limita a una monocapa sino que continua hasta que la superficie queda cubierta con una capa multimolecular de líquido microscópica. (Viades, 2008)

### 3.5. EVALUACIÓN DEL CALOR ISOSTÉRICO DE ADSORCIÓN

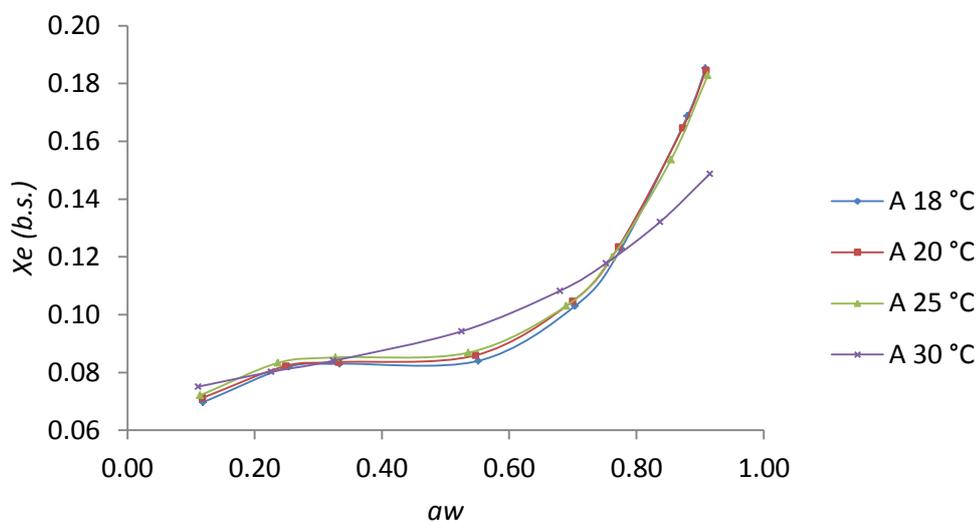
Con el fin de conocer la energía de adsorción de las moléculas de agua a la matriz sólida, es que se calcula calor isostérico de sorción. El calor isostérico de sorción es un parámetro que permite extraer información de la energía necesaria para alcanzar un determinado contenido en humedad durante el proceso de adsorción. (Mascan y Gögüs, 1998). El calor isostérico de adsorción se calculó a partir de los datos obtenidos de las isothermas a las distintas temperaturas, tal y como se expone en el apartado (1.6). Para ello se representó el  $\ln(a_w)$  frente a la inversa de la temperatura ( $1/T$ ), ajustando los puntos a una recta. Por lo cual el calor isostérico de sorción,  $q_{st}$ , de los granos kiwicha de las 2 variedades (Oscar Blanco y Centenario), se consideraron los valores de  $X_e$  especificados en la tabla (3.10) a las temperaturas de evaluación, para las 2 variedades de kiwicha. El  $X_e$  fue determinado con el modelo de Alan y Shove, ya que este presenta el mejor ajuste, en la figura (3.15 y 3.16), se observa el entrecruzamiento de las isothermas, y en el que se puede ver que sucede a una humedad de equilibrio ( $X_e$  de 0.15) siendo está la máxima humedad de equilibrio para la evaluación de  $q_{st}$ , para el caso de los granos de kiwicha variedad Oscar Blanco y para la variedad Centenario un ( $X_e$  de 0.12).

**Tabla 3.10:** Calor isostérico de adsorción para las 2 variedades de granos de kiwicha

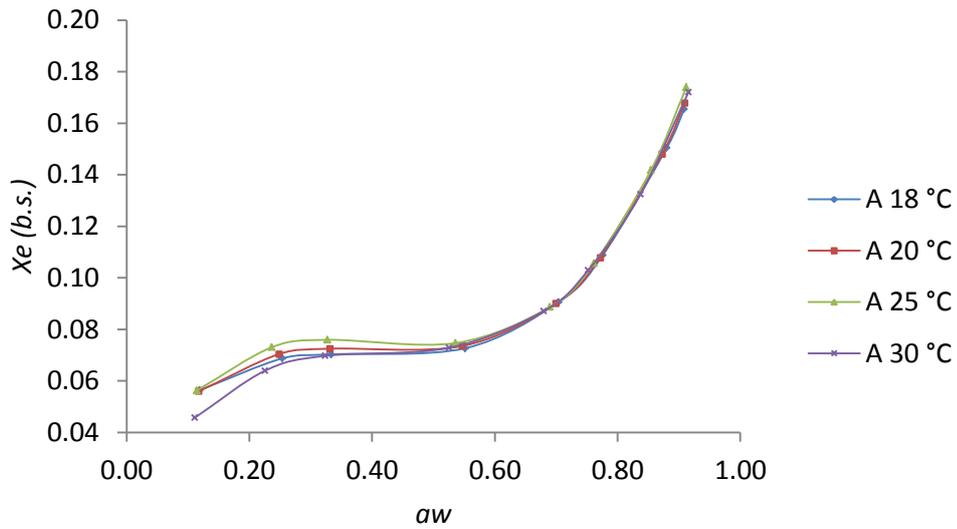
Oscar Blanco			Centenario		
$q_{st}$ (KJ/g)			$q_{st}$ (KJ/g)		
$X_e$ (b.s.)	Experimental*	Ajustado**	$X_e$ (b.s.)	Experimental*	Ajustado**
0.06	6.1075	6.3401	0.04	10.8557	10.8600
0.08	3.9069	3.0474	0.06	2.3460	2.3119
0.10	0.8649	1.4647	0.08	0.3974	0.4921
0.12	0.3712	0.7040	0.10	0.1282	0.1048
0.15	0.0828	0.2346	0.12	0.1746	0.0223

\*Calor isostérico de adsorción obtenido con la ecuación de Clausius-Clayperon

\*\* Calor isostérico de adsorción ajustado con la ecuación de Tsami



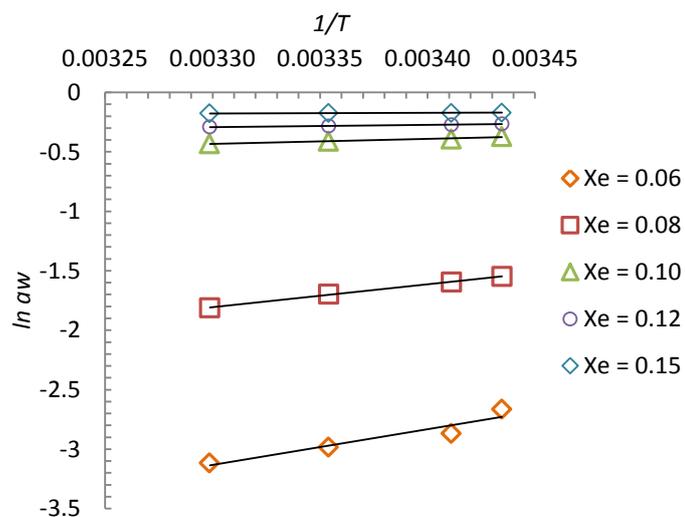
**Figura 3.15:** Isothermas de adsorción para los granos de kiwicha variedad Oscar Blanco ajustadas al modelo de Alan y Shove, para evaluar el  $X_e$  máximo.



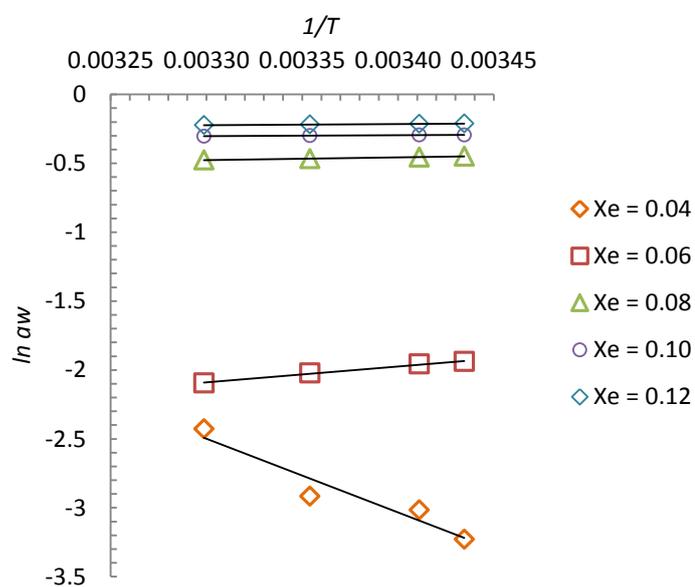
**Figura 3.16:** Isotermas de adsorción para los granos de kiwicha variedad Centenario ajustadas al modelo de Alan y Shove, para evaluar el  $X_e$  máximo.

En las figuras (3.15 y 3.16), se muestran las isotermas adsorción ajustadas con el modelo de Alan y Shove a las temperaturas de evaluación (18, 20, 25 y 30 °C), el entrecruzamiento de estas isotermas indican el punto máximo de la humedad de equilibrio (como se muestra en la tabla 3.10), con el que se calculó el calor isostérico de adsorción, para los granos de kiwicha de la variedad Oscar Blanco y centenario.

El calor isostérico de adsorción se calculó representando el  $\ln(a_w)$  frente a la inversa de la temperatura, ajustando los puntos a una recta, con el fin de calcular la pendiente de dicha recta.



**Figura 3.17:** Logaritmo natural de  $a_w$  en un función de la inversa de la temperatura, para el cálculo del calor isotérico de adsorción, para la variedad Oscar Blanco.

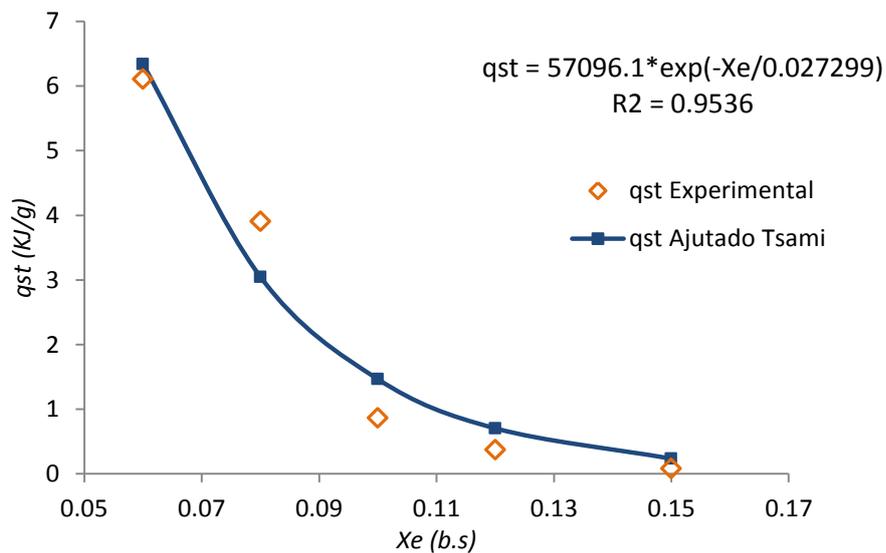


**Figura 3.18:** Logaritmo natural de  $a_w$  en un función de la inversa de la temperatura, para el cálculo del calor isotérico de adsorción, para la variedad Centenario.

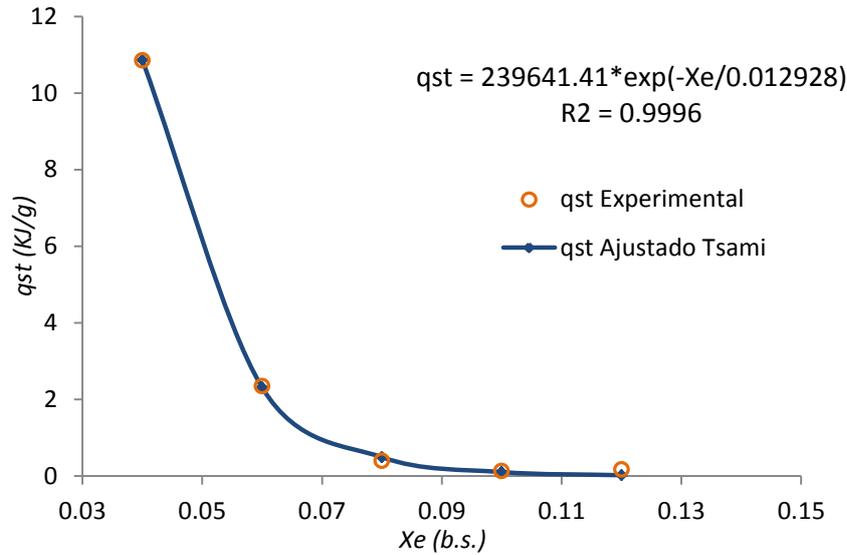
La figura (3.17), presenta valores de logaritmo natural de la actividad de agua en función de la inversa de la temperatura para cada  $X_e$  evaluadas, se puede observar que a un  $X_e = 0.06$  la  $a_w$  disminuye con el incremento de la temperatura, el mismo caso para un  $X_e = 0.08$ , únicamente para el caso de los granos de kiwicha de la variedad Oscar blanco.

En la figura (3.18), se puede observar que para un  $X_e = 0.04$  la  $a_w$  aumenta (sube) con el incremento de la temperatura, pero un caso distinto se presenta para un  $X_e = 0.06$ , la  $a_w$  disminuye con el incremento de la temperatura, con respecto a los granos de kiwicha de la variedad Centenario.

Con los valores obtenidos de las pendientes de las rectas (figuras 3.17 y 3.18), que fueron obtenidas mediante la ecuación de Clausius-Clayperon, estas se emplearon para calcular el calor isostérico neto de adsorción (ecuación 1.14). Dichos resultados se muestran en la tabla (3.10).



**Figura 3.19:** Influencia de la humedad de equilibrio en el calor isostérico de adsorción para los granos de kiwicha variedad Oscar Blanco.



**Figura 3.20:** Influencia de la humedad de equilibrio en el calor isostérico de adsorción para los granos de kiwicha variedad Centenario.

En la figura (3.19 y 3.20) se muestran los valores obtenidos mediante la ecuación (1.14) que es el calor isostérico neto de adsorción experimental, luego esta fue ajustada a la ecuación de Tsami (ecuación 1.16), donde se calculó el calor isostérico de adsorción neto de adsorción ajustado.

En la figura (3.19), se muestran los valores del calor isostérico de adsorción neto en función del contenido de humedad de equilibrio  $X_e$ , estimados de acuerdo a la ecuación de Tsami, en el que se puede observar que el calor isostérico para los granos de kiwicha variedad Oscar Blanco disminuye al incrementar la humedad de equilibrio de 0.06 a 0.15 g de agua/g m.s., el valor de  $q_{st}$  disminuye de 6.3401 a 0.2346 KJ/g (tabla 3.10), este hecho es usual en los alimentos (Labuza, 1984). Este hecho indica que cuanto mayor es el contenido en agua, menor es la energía necesaria para eliminarla a esa concentración. La ecuación de Tsami ajustada,

presenta un coeficiente de correlación  $R^2 = 95.36 \%$ , para los granos de kiwicha de la variedad Oscar Blanco.

$$q_{st} = 57096.1 * \exp(-X_e/0.027299) \quad (3.1)$$

Mientras que para los granos de kiwicha variedad Centenario, en la figura (3.20), se muestran valores de  $q_{st}$  más altos que los encontrados en la variedad Oscar blanco, estos también disminuyen con el incremento de la humedad de equilibrio de 0.04 a 0.12 g de agua/g m.s., y el valor de  $q_{st}$  disminuye de 10.86 a 0.0223 KJ/g que se presentan de igual forma en la tabla (3.10). La ecuación de Tsami ajustada, presenta un coeficiente de correlación  $R^2 = 99.96 \%$ , para los granos de kiwicha de la variedad Centenario.

$$q_{st} = 5239641.41 * \exp(-X_e/0.012928) \quad (3.2)$$

De la figura (3.20) se puede concluir y es evidente que a menores  $X_e$  se necesita mayor energía para poder desprender moléculas de agua ligadas a zonas polares en los macronutrientes (material higroscópico) constituyentes del alimento, debido a que estos (agua) están fuertemente unidos como consecuencia de la similitud entre las fuerzas responsables de la adsorción física y las fuerzas de licuefacción (fuerzas de van der Waals), es por este motivo que es necesario una mayor energía para la liberación o remoción de estas moléculas.

Heldman y Lund (2007), reportaron valores del calor isostérico de sorción de (0.078 kJ/g), para el maíz a la humedad de 0.1 g de agua/g m.s. y temperatura de 22 °C. Resende *et al.* (2006), encontraron que para humedades entre 0.101 a 0.2171 g de agua/g m.s.,  $q_{st}$ , varía de 3.96 a 2.71 kJ/g, en semillas de frijol. Choque (2009), encontró valores de  $q_{st}$  que varían de 7.7022 a 0.0165 kJ/g para el

maíz morado, para una humedad de equilibrio de 0.07 a 0.17 *g* de agua/*g* *m.s.*, reportó que el calor isostérico disminuía con el incremento de la humedad de equilibrio.

Según Zug (2002b), este hecho puede ser explicado considerándose que inicialmente la adsorción ocurre en el sitio disponible más activo, dando origen a una alta energía de interacción. El aumento del calor isostérico al disminuir la humedad puede explicarse teniendo en cuenta que inicialmente la adsorción tiene lugar en los sitios disponibles más activos, lo cual lleva aparejado elevadas energías de sorción. Conforme estos lugares van siendo ocupados, la adsorción tiene lugar en sitios menos activos con una menor energía asociada (Wang y Brennan, 1991). Esto significa que el agua en la región de humedad baja (región de la monocapa) está más fuertemente ligada a la matriz sólida que en la zona de humedad alta (Cadden, 1988).

## CONCLUSIONES

- ✓ Las isothermas de adsorción permitieron evaluar las condiciones de almacenamiento del grano de kiwicha de las variedades Oscar Blanco y Centenario, para intervalos de humedad relativa de 10 a 90 % a las temperaturas de 18°C, 20°C, 25°C y 30 °C.
- ✓ La temperatura tiene efecto sobre humedad de equilibrio ( $X_e$ ) para las dos variedades de kiwicha, cualquier cambio de temperatura influenciara significativamente en la humedad de equilibrio y esta última está relacionada directamente con la actividad del agua a través de las isothermas de adsorción.
- ✓ Se han estudiado 11 modelos matemáticos, de ellos el modelo de Alan y Shove se ajusta de mejor manera a las isothermas de adsorción para ambas variedades de kiwicha a las temperaturas de 18°C, 20°C, 25°C y 30°C.
- ✓ Los parámetros fisicoquímicos del proceso de adsorción se calcularon a partir del modelo de *GAB*, y permitieron evaluar las constantes  $C_{GAB}$ ,  $k$  y  $X_m$  para los granos de kiwicha de ambas variedades.
- ✓ El calor isostérico de adsorción permitió conocer la energía necesaria para alcanzar un determinado contenido en humedad durante el proceso de adsorción en los granos de kiwicha para ambas variedades Oscar Blanco y Centenario.

## RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar un estudio a nivel micrométrico para determinar la porosidad de los granos de kiwicha de las variedades Oscar Blanco y Centenario, debido a que como se observaron en los resultados la humedad de monocapa aumenta con el incremento de la temperatura, por lo cual es necesario saber cuál es la estructura interna de estos granos.
- ✓ Evaluar la estabilidad microbiológica de mohos y levaduras en los granos de kiwicha de las variedades Oscar Blanco y Centenario a actividades de agua superiores a 0.68, para observar si existe la probabilidad de que los granos de kiwicha no sean alterados por microorganismos.
- ✓ Realizar un estudio para determinar la tasa de transferencia de vapor de agua en materiales de empaque para granos y cereales, ya que es un factor importante para evaluar la vida útil de un producto.
- ✓ Realizar un estudio a nivel nanotecnológico para observar la estructura y evaluar el comportamiento de la humedad de monocapa, con el fin de observar que tipo de enlace es que se aparean primero (enlaces químicos o físicos).
- ✓ Estudiar la velocidad de adsorción de agua en los granos de kiwicha de las variedades Oscar Blanco y Centenario u otros productos alimenticios, debido a que es un factor importante para determinar en cuanto tiempo es que se llega a formar la humedad de monocapa y por consiguiente las capas superiores, ya que son determinantes para la estabilidad de un producto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARADO, J.; AGUILERA, J.M. 2001. Métodos para Medir las Propiedades Físicas en la Industria de los Alimentos, Editorial Acribia, S.A.
- ANDRADE, R. D.; LEMUS, R.; PÉRZ. C. 2011. Modelos de isothermas de adsorción para alimentos: usos y limitaciones, departamento de ingeniería de los alimentos. Santiago de Chile.  
  
Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-40042011000300012&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-40042011000300012&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt).
- ASSIS C.; SIMONE F.; PALMEIRA G.1999. Secagem natural de gergelim e determinação da umidade de equilibrio, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, n.3, p.343-348, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB  
  
Disponible en: <http://www.agriambi.com.br/revista/v3n3/343.pdf>.
- AYALA, A. 2011. “Estimación de las isothermas de adsorción y del calor isotérico en la harina de yuca (*Manihot esculenta*, Crantz)”, escuela de ingeniería de los alimentos, Colombia.
- BADUI, S. 1982. Química de los Alimentos. Alhambra Mexicana, Editorial, S.A. de C.V p. 29
- BALA, B.K. 1997. Drying and Storage of Cereal Grains. Science Publishers Inc, New Delhi, Calcutta.
- BARBOSA, C. 1997 Manual de Laboratorio de Ingeniería en Alimentos. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza, España. p. 71-88

- BECKER, R.; Wheeler, E.; LORENZ, K.; STAFFORD, A.; GROSJEAN, O.; BETSCHART, A.; SAUNDERS, R. 1981. A compositional study of amaranth grain. J. Food Sci. 46:1175-1180.

Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2621.1981.tb03018.x/abstract>

- BELL, L. N.; LABUZA, T. P. 2000. Moisture Sorption. Practical aspects of isotherm measurement and use. 2nd Edition. Ed. AACC. pp. 62.
- BRENNAN, J. G. 2008. Manual del Procesado de los alimentos. Edit. ACRIBIA. España
- CÁCERES, B. N. 2002. simulação e Otimização de um Secador Industrial de Túnel para Frutas. Tesis de doctorado. Faculdade de Engenharia de Alimentos - UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil.
- CADDEN, A. 1988. Moisture sorption characteristics of several food fibbers, Journal of Food Science, 53(4), 1150 – 1155.

Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2621.1988.tb13550.x/abstract>

- CALVO, A.; ITURRIZAGA, S.; NYSTROM, J.; SALAS, R. 2001. Fideos imperial enriquecidos con Kiwicha, seminario de agro negocios, universidad del pacifico. Perú.

Disponible en : <https://www.up.edu.pe/carrera/administracion/SiteAssets>

- CAPS, A.; ABRIL, J. 2003. Procesos de Conservación de Alimentos. 2da Edición.

Edit. Mundi- Prensa. España

- CASTRO, C. 1987. Procesamiento de kiwicha por el método de expansión por explosión. Tesis UNALM, Lima – Perú.
- CEBALLOS P.; ADELA, M.; GIRALDO, G.; GLORIA, I.; ORREGO; A. 2009. “Evaluación de varios modelos de isotermas de adsorción de agua de un polvo de fruta deshidratada” departamento de química V.4. Colombia.
- COLLAZOS, C. ALVISTUR, E.; VÁSQUEZ, J.; QUIROZ, A.; HERRERA, N.; ROBLES, N.; ARIAS, M.; VIÑAS, E.; URQUIETA, R.; DIAS, C.; ROCA, A.; FACHING, A.; HERNÁNDEZ, E.1998. La composición de alimentos de mayor consumo en el Perú. Instituto Nacional de Nutrición. Lima – Perú
- COMAPOSADA, J. 1999. Sorption isotherms and water diffusivity in muscles of pork ham at different NaCl contents. Tesis Doctoral. Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanya.
- COMAPOSADA, J.; GOU, P.; ARNAU, J. 2000. The effect of sodium chloride content and temperature on pork meat isotherms. *Meat Science*, 55(3), 291– 295.
- CHAPILLIQUÉN, LI. M.; ALVIS, H. R.,2006.Aplicación de métodos de bioingeniería cutánea en la evaluación de la eficacia de una formulación dermocosmética elaborado a base de *Amaranthus caudatus* L. “Kiwicha”- tesis- UNMSM.
- CHASQUIBOL, S.; DELMAS, R.; RIVERA, C.; LENGUA, C.; AGUIRRE, M.; BAZÁN, G.; BECERRA, V. y BAUTISTA, C. 1999. Contribución a la normalización de productos tradicionales andinos: Maca, Kiwicha, Cañihua, Mashua, Fac. de química UNMSM. Perú.

- CHEFTEL, J. C.; CHEFTEL, H. 2000. Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos. Vol. I. Edit. ACRIBIA. España.
- CHIPANA, M.; STUVA, C. 2005 kiwicha producto de exportación en el Perú. Artículo ministerio de la producción.  
  
Disponible en: [http://www.sierraexportadora.gob.pe/perfil\\_comercial/KIWICHA.pdf](http://www.sierraexportadora.gob.pe/perfil_comercial/KIWICHA.pdf)
- CHOQUE, D., 2009. "isotermas de adsorción de maíz morado (*Zea mays L.*), Facultad de ingeniería. Perú.
- CHOQUE Q.; LLALLA C.; SOLANO R.; LIGARDA S.; CHOQUE Q. 2010. Modelamiento matemático de las isotermas de adsorción de la quinua (*Chenopodium quinoa*) variedad blanco de Junín. Escuela de ingeniería Agroindustrial. Perú
- DENDY, D.; DOBRASZCZYK, B.J. 2001. Cereales y Productos derivados. Edit. ACRIBIA. España.
- FAO/OMS 1973. Contenido de aminoácidos de los alimentos y datos biológicos sobre proteínas. Informe N° 24 Roma–Italia.
- FAO/OMS 1985. Necesidades de energía y de proteínas. Informe N° 724 Roma–Italia
- FELLOWS, P. 2000. Food Processing Technology - Principles and Practice. 2da edición. Edit. TJ International. England.
- FENNEMA, O. 2000. Química de los alimentos. 2º Edición. Editorial ACRIBIA–España.
- FENNEMA, O.; KAREL, M.; LUND, D. 1975. Principles of food science - Physical

principles of food preservation – part II. Edit. Marcel Dekker INC. – New York – USA.

- FUENTES, A. 1996. Predicción de la Actividad de Agua en Harinas Precocidas de Quinchoncho (*Cajanus cajan L. mil sp*) y Habas (*Canavalia ensiformis*) y Sus Mezclas”. Trabajo De Grado Maestría. Udo Venezuela. p.12.
- GABAS, A.L. 1998. Secagem de uva Itália em leito fixo. Tesis de maestría. Faculdade de Engenharia de Alimentos-UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil.
- GARCÍA, L.; KOBYLANSKY, J.; PILOSOF, A. 2000. Modelling water sorption in okara soy milk. Drying Technology, 18(9), 2091 – 2103.

Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373930008917827#>.

VH77SMlhFGY

- GUTIERREZ, H.; DE LA VARA, R. 2007. Análisis y diseño de experimentos, 2da edición, edit. Mc Graw Hill, Mexico.
- HELDMAN, D.; LUND D. 2007. Handbook of Food Engineering. 2da edic. Editorial. CRC Press. Florida – EE. UU.
- HERMIDA, J.R. 2000. Fundamentos de Ingeniería de Procesos Agroalimentarios. Edit. Mundi- Prensa. España.
- HIGINIO, R. 2011. ELABORACIÓN DE UNA MEZCLA INSTANTÁNEA DE ARROZ (*Oryza sativa*), CAÑIHUA (*Chenopodium pallidicaule Aellen*) y Kiwicha (*Amaranthus caudatus*) POR EL MÉTODO DE COCCIÓN EXTRUSIÓN- proyecto de investigación-UNAC. Lima. Perú
- HUAMAN, N. 2001. Predicción de la actividad de agua utilizando el modelo

matemático de G.A.B. en el proceso de deshidratación osmótica del capulí (*phisalis peruviana*) Tesis MSc. Tecnología de Alimentos. UNALM.

- ICMSF 1998. Microorganismos de los Alimentos. Edit. Zaragoza. España.
- IGLESIAS, A.; CHIRIFE, J. 1976a. Isosteric heats of water vapor sorption on dehydrated foods. Part I. Analysis of the differential heat curves. Lebensmittel – Wissenschaft und Technology, v. 9, p. 116-122.
- IGLESIAS, A. H.; CHIRIFE, J. 1982. Handbook of isotherms: Water sorption parameters for food and food components. Edit. Academic press, inc. E.E.U.U.
- JAY, J. 2000. Microbiología moderna de los alimentos. 4ta Edic. Edit. ACRIBIA. España.
- LABUZA, T. P. 1970. Properties Of Water and the Keeping Quality Of foods. Memorias del III Congreso International de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Washington, D.C., EUA. SOS/70 p. 618-635
- LABUZA, T. P.; KANANE A.; CHEN J. 1985. Effect of temperature on the moisture sorption isotherm and water activity shift of two dehydrated food. Journal Food Science, v. 50, No 2, p. 385-391.
- LABUZA, T. P. 1980. Influence Of Relative Humidity of the Physicochemical State of Lactose in Spray-Dried Sweet Whey Powders. Journal of Food Processing and Preservation V.45, N.5: 1231-1236
- LARA A.; VEGA G.; SANDERS M.; MARTÍNEZ A. 2009. Estudio de secado industrial de la quinua (*Chenopodium quinoa willd*) cultivada en Chile departamento de ingeniería de los alimentos, la Serena Chile

- LAZARTE, P. J. 2006. Diseño de un sistema de monitoreo a distancia basado en tecnología web para el proceso de tostado de granos de Kiwicha.
- MADIGAN, G. 2003. Brock: Biología de los microorganismos. 10ª Edición. Ed. Pearson-Prentice-Hall, Madrid. p. 1-20
- MARTÍNEZ, N.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A.; FITO, P. 1998. Termodinámica y cinética de Sistemas alimento entorno. servicio de publicaciones, Universidad Politécnica De Valencia. Ref. 98.4034. p.170-198
- MASKAN, M.; GÖGÜS, F. 1998. Sorption isotherms and drying characteristics of mulberry (*Morus alba*). Journal of Food Engineering, 37(4), 437 – 449.
- Mc CABE, L. W. C.; SMITH, J.; HARRIOT P. 2007. Operaciones unitarias en ingeniería química. Editorial Mc Graw Hill. Séptima Edición. México.
- MOSSEL, D. A. A.; WESTERDIJK, J. 1949. The physiology of microbial spoilage in foods 15: 190.  
  
Disponible en: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02062646>
- MULTON, J.L.; BIZOT H. 1980. Water Adsorption in Cereal Food and Water Activity Measurement. p.97-119
- ORREGO, A. C. 2003. "Procesamiento de alimentos", 1era edición, edit. Manizales, Colombia.
- OSPINA, J.; ALDANA, H. 1995. Ingeniería y Agroindustria-Enciclopedia Agropecuaria. Edit. Acribia. 1era edición, España.
- OSWIN CR. 1946. The kinetics of package life. III. Isotherm. J Soc Chem Ind Dec;

65 (12): 419-421.

- PEÑA B.; CARBALLO C. 2013. Water Adsorption Isotherms of Amaranth (*Amaranthus caudatus*) Flour, *Food and Nutrition Sciences*, 2014, 5, 153-157
- POTUS, J.; DRAPON, R.; BAKOTOZAFY, L. 1992. *Industries des cereals*, 79, 13.
- PRIETO, F.; GORDILLO, A.; PRIETO, J.; GÓMEZ, C.; ROMÁN, A. 2006. Evaluación de las isothermas de sorción en cereales para desayuno. *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales*.
- QUINTANA, J. 2007. Análisis y Diseño de Empaques Flexibles Laminados para envasar alimentos, tesis para obtener el título de ingeniero mecánico, Ecuador-Guayaquil.  
(<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/12228/1/Tesis%20Final.pdf>)
- RAMÍREZ, D. 2012. Determinación de isothermas de sorción en harina de maíz a tres temperaturas y su ajuste a modelos matemáticos, tesis que para obtener el grado de maestro en ciencias en alimentos, México D.F.
- RAMÍREZ, D. 2012. "Determinación de las isothermas de sorción de maíz a tres temperaturas y su ajuste a modelos matemáticos" escuela nacional de ciencias biológicas, México.
- RANGEL, M.; CÓRDOVA, A.; CERÓN, J.2010. "Isothermas de sorción de rodajas liofilizadas de Noni (*Morinda Citrifolia* L.) Deshidratada osmóticamente" facultad de química. México.
- REPO-CARRASCO, R. 1992. Cultivos andinos y la alimentación infantil. Comisión de Coordinación de Tecnología Andina CCTA. Lima-Perú.

- RESENDE, O.; CORREA, C.; GONELL, L.; RIBEIRO, M. 2006. Isotermas e Calor Isostérico de Sorção do Feijão. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 2006. SP- Brasil.  
  
Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cta/v26n3/31766.pdf>
- SANCHEZ, M. 1983. Dos cultivos olvidados de importancia agroindustrial. El amaranto y la quinua. Archivos Latinoamericanos de Nutrición 33(1):11-32.
- SARAVALCOS, G.; TSIOURVAS, D.; TSAMI. 1986. Effect of temperature on the water adsorption isotherms of sultana raisins. Journal of food science, vol 51 N° 02.
- SCOTT, W. J. 1953. Water relations of Staphylococcus. Aureus at 30°C. Aust. J. Biol. Sci. 6:549.
- SCHMALKO, M.E.; AYALA, M.; MARTIN, C.; CARRATINI, D. 2008. “Isotermas de adsorción del polvo de la yerba mate con aglomerantes utilizados en el entrapamiento de compuestos” FCEQyN- Universidad Nacional de Misiones Argentina.
- SHAFIUR, R. 2003. Manual de Conservación de los Alimentos. Editorial ACRIBIA – España.
- SOLEIMANI, M.; TABIL, L.; SHAHEDI, M.; EMANI, S. 2006. Sorption isotherm of hybrid seed corn. The Canadian society for engineering in agricultural, food, environmental, and biological systems CSBE.
- STATISTICA For WINDOWS 5.0. 1995. Computer program manual. Tulsa, OK. StatSoft, Inc.
- TAPIA, M. 2000. Los cultivos andinos sub explotados y su aporte a la alimentación.

Santiago de Chile – Chile.

- TOLOABA, M. P.; PELTZER, M.; ENRIQUEZ, N.; POLLIO, M. L. 2004. Grain Sorption Equilibrium of Quinoa Grains. *Journal of Food Engineering*, V. 61, N. 3: 365-371
- TÓTH, J. 2001. ADSORPTION. Theory, Modeling, and Analysis. Edit. Marcel Dekker, Inc. New York.
- TROLLER, J. A. 1973. Influence of Water Activity on Microorganisms in Foods. *Food Technology*, V.34, p.76-82.
- TRUJILLO, F. J., YEOW, P. Ch.; PHAM, Q. T. 2003. Moisture sorption isotherm of fresh lean beef and external beef fat. *Journal of Food Engineering*, 60(4), 357–366.
- TSAMI, E.; MAROULIS, Z.; MARINOS, K.;D.; SARAVALOS, G. 1990b. Heat of Sorption of Water in Dried Fruits. *International Journal of Food Science and technology*. v. 25.
- VIADES, T. 2008. Adsorción de agua en alimentos. Isoterma de adsorción de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB). Seminario de Investigación: Fenómenos de Superficie, Postgrado en Ciencias Químicas, UNAM México.
- WANG, N.; BRENNAN, J. G., 1991. Moisture sorption isotherm characteristics of potato at four temperatures. *Journal of Food Engineering* v. 14, p. 269-287.  
  
Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/026087749190018N>
- Zug, J. 2002a. Físicoquímica Especial. Isoterma de Sorción de tres etapas y modelos de sorción restringida. Fac. Ing. UBA. Argentina.

- ZUG, J. 2002b. Fisicoquímica Especial. Isoterma de Sorción de tres etapas y modelos de sorción restringida. Fac. Ing. UBA. Argentina.

Disponible en: <http://www.pdfio.net/k-46953315.html>

## **WEBGRAFÍA**

- [http://www.fao.org/Regional/LAmerica/prior/segalim/prodalim/prodveg/cdrom/contenido/libro07/Cap3\\_4/1993.htm](http://www.fao.org/Regional/LAmerica/prior/segalim/prodalim/prodveg/cdrom/contenido/libro07/Cap3_4/1993.htm) (fecha de ingreso 16/03/14 - 3:20pm)
- [www.greensur.com](http://www.greensur.com) (fecha de ingreso 2/04/14 -5:00am)
- [www.minag.gob.pe](http://www.minag.gob.pe) (fecha de ingreso 15/03/14- 4:50pm)
- [www.peruecologico.com](http://www.peruecologico.com) (fecha de ingreso 20/03/14 -3:40am).
- <http://www.fao.org/docrep/x5027S/x5027S0d.htm#IV.%20Almacenamiento%20de%20granos%20en%20propiedades%20rurales> (fecha de ingreso 26/11/14 - 10:40am).
- <http://www.oban.cl/difusion-HDPE-descubrimiento-utilizacion-propiedades.htm> (fecha de ingreso 27/11/14- 11:12 am)

# **ANEXOS**

**Anexo 01:** Sustancias químicas y sus ecuaciones para obtener  $a_w$  a la temperatura deseada (en Kelvin)

Nomenclatura	Sustancia química	Ecuación de regresión	Pureza	Fuente
Cloruro de Litio	LiCl	$\ln a_w = (500.95/T) - 3.85; R^2 = 0.998$	99.14%	Labuza <i>et al.</i> , 1985
Acetato de Potasio	KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	$\ln a_w = (961.39/T) - 4.33; R^2 = 0.98$	99.0%	Labuza <i>et al.</i> , 1985
Cloruro de Magnesio	MgCl	$a_w = 0.365 - 2.532 \times 10^{-3}T + 5.071 \times 10^{-5}T^2 - 4.166 \times 10^{-7}T^3; R^2 = 0.963$	99.9%	Labuza <i>et al.</i> , 1985
Nitrato de Magnesio	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	$\ln a_w = (356.60/T) - 1.82; R^2 = 0.99$	99.8%	Labuza <i>et al.</i> , 1985
Yoduro de Potasio	KI	$\ln a_w = (255.90/T) - 1.23; R^2 = 1.00$	99.5%	Labuza <i>et al.</i> , 1985
Cloruro de Sodio	NaCl	$\ln a_w = (228.92/T) - 1.04; R^2 = 0.96$	100.0%	Labuza <i>et al.</i> , 1985
Cloruro de Potasio	KCl	$\ln a_w = (367.58/T) - 1.39; R^2 = 0.97$	100.0%	Labuza <i>et al.</i> , 1985
Cloruro de Bario	BaCl	$a_w = 0.908 - 4.011 \times 10^{-4}T + 2.786 \times 10^{-5}T^2 - 2.037 \times 10^{-7}T^3; R^2 = 0.997$	99.0%	Gabas, 1998

**Anexo 02:** Variación de peso de los granos de kiwicha, hasta alcanzar la humedad de equilibrio ( $x_e$ )

**A.** Variación de peso de los granos de kiwicha, hasta alcanzar la humedad de equilibrio ( $x_e$ ) a 18 °C para variedad Oscar Blanco

Sol. saturada	%HRE	Réplica	Día 0	Día 3	Día 6	Día 9	Día 12	Día 15
LiCl	11.8908	R1	1.2881	1.2781	1.2779	1.2741	1.2735	1.2730
		R2	0.9989	0.9882	0.9874	0.9868	0.9865	0.9858
		R3	1.0720	1.0598	1.0590	1.0579	1.0577	1.0570
CH <sub>3</sub> COOK	25.3746	R1	1.1613	1.1462	1.1476	1.1442	1.1438	1.1430
		R2	1.0914	1.0772	1.0755	1.0747	1.0746	1.0741
		R3	1.1701	1.1549	1.1534	1.1527	1.1521	1.1515
MgCl	33.3586	R1	1.1519	1.1481	1.1476	1.1473	1.1474	1.1472
		R2	1.1682	1.1683	1.1680	1.1678	1.1679	1.1676
		R3	1.1094	1.1025	1.1021	1.1013	1.1011	1.1007
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	55.1451	R1	1.1672	1.2321	1.2328	1.2413	1.2424	1.2420
		R2	1.2439	1.3095	1.3155	1.3171	1.3182	1.3170
		R3	1.0833	1.1111	1.1131	1.1143	1.1146	1.1143
KI	70.3933	R1	1.2298	1.2444	1.2448	1.2450	1.2458	1.2462
		R2	1.1568	1.2176	1.2187	1.2257	1.2283	1.2272
		R3	1.1734	1.2155	1.2185	1.2193	1.2198	1.2190
NaCl	77.5895	R1	1.1691	1.1961	1.1971	1.1982	1.1991	1.1988
		R2	1.0770	1.1007	1.1027	1.1033	1.1039	1.1042
		R3	1.2649	1.2920	1.2930	1.2957	1.2965	1.2970
KCl	88.0303	R1	1.0873	1.1430	1.1470	1.1490	1.1496	1.1502
		R2	1.0441	1.0989	1.1009	1.1036	1.1042	1.1050
		R3	1.1791	1.2382	1.2402	1.2433	1.2452	1.2443
BaCl	90.8619	R1	1.3067	1.4042	1.4142	1.4243	1.4274	1.4267
		R2	1.1438	1.2389	1.2589	1.2607	1.2632	1.2626
		R3	1.1207	1.2194	1.2294	1.2345	1.2375	1.2370

B. Variación de peso de los granos de kiwicha, hasta alcanzar la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) a 20 °C para la variedad Oscar

Blanco

Sol. saturada	%HRE	Réplica	Día 0	Día 3	Día 6	Día 9	Día 12	Día 15
LiCl	11.7520	R1	1.1331	1.1218	1.1215	1.1217	1.1210	1.1208
		R2	1.2151	1.2005	1.2003	1.2005	1.2003	1.2001
		R3	1.1041	1.0908	1.0900	1.0898	1.0904	1.0908
CH <sub>3</sub> COOK	24.8675	R1	1.1752	1.1583	1.1579	1.1577	1.1575	1.1576
		R2	1.2695	1.2514	1.2510	1.2509	1.2500	1.2499
		R3	1.0801	1.0642	1.0640	1.0644	1.0620	1.0629
MgCl	33.1491	R1	1.3094	1.3049	1.3054	1.3059	1.3058	1.3060
		R2	1.1423	1.1427	1.1429	1.1433	1.1427	1.1425
		R3	1.1182	1.1102	1.1100	1.1098	1.1096	1.1098
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	54.6862	R1	1.2314	1.2331	1.2341	1.3151	1.3160	1.3168
		R2	1.1423	1.1482	1.1782	1.2068	1.2069	1.2169
		R3	1.1593	1.1942	1.1949	1.1952	1.1956	1.1958
KI	69.9725	R1	1.1886	1.2035	1.2038	1.2044	1.2045	1.2043
		R2	1.2762	1.2904	1.2944	1.2466	1.2433	1.3529
		R3	1.0448	1.0578	1.0678	1.0857	1.0870	1.0879
NaCl	77.1744	R1	1.0033	1.0178	1.0258	1.0305	1.0308	1.0311
		R2	1.0942	1.1001	1.1211	1.1221	1.1228	1.1233
		R3	1.1788	1.1989	1.2079	1.2102	1.2107	1.2109
KCl	87.2753	R1	1.0882	1.1494	1.1500	1.1511	1.1520	1.1527
		R2	1.2670	1.3340	1.3380	1.3389	1.3419	1.3421
		R3	1.0796	1.1308	1.1368	1.1398	1.1428	1.1434
BaCl	90.9492	R1	1.2138	1.3118	1.3148	1.3214	1.3238	1.3241
		R2	1.3743	1.4883	1.4923	1.5046	1.5066	1.5068
		R3	1.1603	1.2625	1.2695	1.2747	1.2757	1.2769

C. Variación de peso de los granos de kiwicha, hasta alcanzar la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) a 25 °C para la variedad Oscar

Blanco

Sol. saturada	%HRE	Réplica	Día 0	Día 3	Día 6	Día 9	Día 12	Día 15
LiCl	11.4200	R1	1.0315	1.0184	1.0180	1.0171	1.0189	1.0193
		R2	1.0505	1.0357	1.0350	1.0342	1.0333	1.0336
		R3	1.2393	1.2206	1.2190	1.2186	1.2187	1.2187
CH <sub>3</sub> COOK	23.6718	R1	1.0504	1.0386	1.0380	1.0373	1.0373	1.0373
		R2	1.0591	1.0472	1.0468	1.0463	1.0462	1.0463
		R3	1.0920	1.0780	1.0775	1.0764	1.0765	1.0766
MgCl	32.7109	R1	1.0483	1.0440	1.0439	1.0439	1.0439	1.0433
		R2	1.0666	1.0668	1.0665	1.0662	1.0663	1.0664
		R3	1.2393	1.2206	1.2196	1.2186	1.2186	1.2187
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	53.5820	R1	1.0724	1.0732	1.0730	1.0731	1.0725	1.0722
		R2	1.1098	1.1165	1.1160	1.1158	1.1157	1.1160
		R3	1.1760	1.2139	1.2137	1.2138	1.2140	1.2142
KI	68.9556	R1	1.0144	1.0283	1.0275	1.0270	1.0270	1.0270
		R2	1.2049	1.2165	1.2160	1.2159	1.2170	1.2175
		R3	1.0807	1.0919	1.0922	1.0925	1.0925	1.0926
NaCl	76.1703	R1	1.0246	1.0509	1.0506	1.0507	1.0510	1.0512
		R2	1.0178	1.0418	1.0419	1.0419	1.0420	1.0423
		R3	1.2603	1.2915	1.2917	1.2918	1.2920	1.2921
KCl	85.4592	R1	1.0866	1.1435	1.1437	1.1439	1.1438	1.1440
		R2	1.1925	1.2525	1.2529	1.2537	1.2545	1.2550
		R3	1.0945	1.1492	1.1525	1.1530	1.1536	1.1539
BaCl	91.2202	R1	1.0484	1.1376	1.1396	1.1410	1.1415	1.1416
		R2	1.1074	1.2087	1.2088	1.2089	1.2093	1.2095
		R3	1.0832	1.1800	1.1810	1.1827	1.1835	1.1837

D. Variación de peso de los granos de kiwicha, hasta alcanzar la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) a 30 °C para la variedad Oscar

Blanco

Sol. saturada	%HRE	Réplica	Día 0	Día 3	Día 6	Día 9	Día 12	Día 15
LiCl	11.1079	R1	1.1529	1.1390	1.1370	1.1360	1.1360	1.1364
		R2	1.0596	1.0455	1.0452	1.0442	1.0443	1.0441
		R3	1.0664	1.0558	1.0538	1.0536	1.0538	1.0542
CH <sub>3</sub> COOK	22.5703	R1	1.2731	1.2595	1.2165	1.2031	1.2034	1.2037
		R2	1.2337	1.2206	1.2186	1.2120	1.2129	1.2120
		R3	1.0796	1.0697	1.0687	1.0650	1.0659	1.0658
MgCl	32.3701	R1	1.2291	1.2187	1.2139	1.2142	1.2142	1.2239
		R2	1.0911	1.0933	1.0940	1.0960	1.0965	1.0957
		R3	1.0710	1.0739	1.0749	1.0756	1.0766	1.0760
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	52.5353	R1	1.0550	1.0824	1.0898	1.0995	1.0995	1.0997
		R2	1.0220	1.0558	1.0658	1.0740	1.0744	1.0747
		R3	1.1334	1.1602	1.1700	1.1802	1.1812	1.1817
KI	67.9863	R1	1.0566	1.0745	1.0745	1.0701	1.0701	1.0703
		R2	1.0610	1.0759	1.0709	1.0718	1.0725	1.0730
		R3	1.1738	1.1795	1.1835	1.1845	1.1848	1.1855
NaCl	75.2118	R1	1.0652	1.0873	1.0883	1.0907	1.0910	1.0910
		R2	1.1544	1.1748	1.1768	1.1810	1.1813	1.1813
		R3	1.1556	1.1812	1.1822	1.1839	1.1839	1.1840
KCl	83.7390	R1	1.1121	1.1567	1.1657	1.1675	1.1675	1.1679
		R2	1.1318	1.1864	1.1894	1.1961	1.1911	1.1915
		R3	1.1094	1.1393	1.1593	1.1630	1.1634	1.1638
BaCl	91.5541	R1	1.1828	1.2258	1.2358	1.2416	1.2426	1.2430
		R2	1.0294	1.0699	1.0789	1.0865	1.0870	1.0873
		R3	1.0081	1.2399	1.2699	1.2898	1.2958	1.2961

E. Variación de peso de los granos de kiwicha, hasta alcanzar la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) a 18 °C para la variedad Centenario

Sol. saturada	%HRE	Réplica	Día 0	Día 3	Día 6	Día 9	Día 12
LiCl	11.8908	R1	1.4084	1.3973	1.3970	1.3949	1.3938
		R2	1.0878	1.0806	1.0800	1.0794	1.0784
		R3	1.0802	1.0738	1.0730	1.0725	1.0721
CH <sub>3</sub> COOK	25.3746	R1	1.0709	1.0648	1.0640	1.0635	1.0632
		R2	1.3012	1.2884	1.2881	1.2865	1.2857
		R3	1.2316	1.2199	1.2190	1.2181	1.2174
MgCl	33.3586	R1	1.4635	1.4646	1.4640	1.4641	1.4644
		R2	1.3481	1.3502	1.3500	1.3497	1.3495
		R3	1.1388	1.1416	1.1412	1.1413	1.1409
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	55.1451	R1	1.2117	1.2286	1.2289	1.2293	1.2292
		R2	1.1486	1.1960	1.1964	1.1928	1.1986
		R3	1.0485	1.0738	1.0743	1.0762	1.0763
KI	70.3933	R1	1.2020	1.1425	1.1434	1.1448	1.1459
		R2	1.0610	1.0777	1.0787	1.0784	1.0790
		R3	1.0861	1.1083	1.1090	1.1094	1.1099
NaCl	77.5895	R1	1.1256	1.1547	1.1557	1.1570	1.1572
		R2	1.2652	1.2964	1.2984	1.3006	1.3016
		R3	1.1568	1.1855	1.1895	1.1879	1.1888
KCl	88.0303	R1	1.3628	1.4371	1.4381	1.4448	1.4456
		R2	1.1802	1.2464	1.2494	0.2512	1.2520
		R3	1.1772	1.2450	1.2470	1.1503	1.2508
BaCl	90.8619	R1	1.2384	1.3544	1.3554	1.3782	1.3844
		R2	1.2697	1.3828	1.3888	1.4040	1.4049
		R3	1.1220	1.2213	1.2283	1.2366	1.2375

F. Variación de peso de los granos de kiwicha, hasta alcanzar la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) a 20 °C para la variedad Centenario

Sol. saturada	%HRE	Réplica	Día 0	Día 3	Día 6	Día 9	Día 12
LiCl	11.7520	R1	1.1624	1.1527	1.1520	1.1528	1.1519
		R2	1.2775	1.2689	1.2680	1.2687	1.2684
		R3	1.2447	1.2380	1.2381	1.2386	1.2383
CH <sub>3</sub> COOK	24.8675	R1	1.1176	1.1115	1.1111	1.1112	1.1108
		R2	1.0930	1.0818	1.0813	1.0818	1.0810
		R3	1.1500	1.1385	1.1382	1.1386	1.1382
MgCl	33.1491	R1	1.1618	1.1637	1.1636	1.1639	1.1640
		R2	1.2001	1.2001	1.2000	1.2001	1.2002
		R3	1.1255	1.1292	1.1290	1.1289	1.1290
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	54.6862	R1	1.1700	1.1880	1.1886	1.1890	1.1891
		R2	1.1523	1.1816	1.1823	1.2034	1.2039
		R3	1.2392	1.2731	1.2740	1.2743	1.2751
KI	69.9725	R1	1.1962	1.2138	1.2238	1.2345	1.2348
		R2	1.3408	1.3607	1.3697	1.3643	1.3649
		R3	1.1207	1.1366	1.1396	1.1456	1.1459
NaCl	77.1744	R1	1.2464	1.2802	1.2812	1.2815	1.2808
		R2	1.2577	1.2824	1.2704	1.2922	1.2928
		R3	1.3021	1.3375	1.3385	1.3389	1.3380
KCl	87.2753	R1	1.1532	1.2219	1.2234	1.2250	1.2258
		R2	1.1664	1.2354	1.2364	1.2375	1.2373
		R3	1.2786	1.3556	1.3576	1.3588	1.3606
BaCl	90.9492	R1	1.1667	1.2857	1.2977	1.3216	1.3373
		R2	1.1156	1.2263	1.2303	1.2318	1.2320
		R3	1.1005	1.2056	1.2126	1.2161	1.2179

**G.** Variación de peso de los granos de kiwicha, hasta alcanzar la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) a 25 °C para la variedad Centenario

Sol. saturada	%HRE	Réplica	Día 0	Día 3	Día 6	Día 9	Día 12
LiCl	11.4200	R1	1.1884	1.1736	1.1730	1.1731	1.1725
		R2	1.0647	1.0542	1.0540	1.0543	1.0531
		R3	1.1130	1.1037	1.1031	1.1027	1.1026
CH <sub>3</sub> COOK	23.6718	R1	1.0643	1.0457	1.0452	1.0444	1.0434
		R2	1.1056	1.0949	1.0940	1.0937	1.0927
		R3	1.1773	1.1672	1.1673	1.1664	1.1648
MgCl	32.7109	R1	1.0995	1.1013	1.1010	1.1007	1.0997
		R2	1.0108	1.0134	1.0128	1.0123	1.0117
		R3	1.0658	1.0689	1.0682	1.0680	1.0668
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	53.5820	R1	1.1483	1.1714	1.1704	1.1699	1.1700
		R2	1.1647	1.2038	1.2028	1.2030	1.2015
		R3	1.1956	1.2374	1.2370	1.2366	1.2359
KI	68.9556	R1	1.2204	1.2369	1.2370	1.2379	1.2391
		R2	1.1749	1.1900	1.1904	1.1905	1.1905
		R3	1.1537	1.1677	1.1677	1.1676	1.1679
NaCl	76.1703	R1	1.1117	1.1349	1.1340	1.1345	1.1365
		R2	1.1779	1.2126	1.2136	1.2138	1.2140
		R3	1.1711	1.1957	1.1950	1.1965	1.1969
KCl	85.4592	R1	1.0880	1.1431	1.1461	1.1482	1.1487
		R2	1.1295	1.1897	1.1907	1.1912	1.1914
		R3	1.1604	1.2310	1.2370	1.2381	1.2385
BaCl	91.2202	R1	1.3718	1.4065	1.5065	1.5068	1.5071
		R2	1.2307	1.3438	1.3634	1.3669	1.3675
		R3	1.2488	1.3409	1.3871	1.3910	1.3907

H. Variación de peso de los granos de kiwicha, hasta alcanzar la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) a 30 °C para la variedad Centenario

Sol. saturada	%HRE	Réplica	Día 0	Día 3	Día 6	Día 9	Día 12
LiCl	11.1079	R1	1.4338	1.4124	1.4121	1.4083	1.4080
		R2	1.2945	1.2781	1.2750	1.2716	1.2720
		R3	1.3680	1.3500	1.3480	1.3460	1.3467
CH <sub>3</sub> COOK	22.5703	R1	1.3605	1.3296	1.3296	1.3263	1.3251
		R2	1.4756	1.4557	1.4557	1.4520	1.4500
		R3	1.2223	1.2069	1.2069	1.2041	1.2025
MgCl	32.3701	R1	1.3801	1.3813	1.3800	1.3785	1.3765
		R2	1.2106	1.2134	1.2122	1.2107	1.2094
		R3	1.2109	1.2143	1.2113	1.2107	1.2106
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	52.5353	R1	1.1983	1.2222	1.2301	1.2269	1.2267
		R2	1.2382	1.2342	1.2842	1.2876	1.2873
		R3	1.1957	1.2226	1.2286	1.2397	1.2407
KI	67.9863	R1	1.1142	1.1261	1.1261	1.1235	1.1254
		R2	1.2737	1.2834	1.2834	1.2827	1.2825
		R3	1.2894	1.3004	1.3004	1.2970	1.2976
NaCl	75.2118	R1	1.3623	1.3803	1.3823	1.3888	1.3940
		R2	1.3037	1.3110	1.3220	1.3343	1.3347
		R3	1.3688	1.3959	1.3979	1.3994	1.3998
KCl	83.7390	R1	1.2846	1.3447	1.3457	1.3459	1.3466
		R2	1.2703	1.3075	1.3270	1.3379	1.3377
		R3	1.1674	1.2016	1.2116	1.2283	1.2281
BaCl	91.5541	R1	1.3026	1.4088	1.4188	1.4499	1.4398
		R2	1.2076	1.3122	1.3422	1.3571	1.3475
		R3	1.3039	1.4007	1.4307	1.4408	1.4311

### Anexo 03: Propiedades del polietileno de alta densidad (HDPE)

PROPIEDADES DEL HDPE	
Densidad	0.94 a 0.965 g/cm
$T_g$	-120 °C
$T_{fusión}$	128 – 138 °C
Modulo de Tensión	620 - 1089 Mpa (89900 - 158000 psi)
Elongación	10 - 1200%
Resistencia al rasgado	20 - 60 g/25µm
WVTR	125 g µm/m <sup>2</sup> d a 37.8 °C, 90 %HRE 0.32 g mil/100 in <sup>2</sup> d a 95°F, 90 %HRE
Permeabilidad al O <sub>2</sub> , 25 °C	40000-73000 cm <sup>3</sup> µm / m <sup>2</sup> d atm 100-185 cm <sup>3</sup> mil / 100 in <sup>2</sup> d atm
Permeabilidad al CO <sub>2</sub> , 25 °C	200000-250000 cm <sup>3</sup> µm / m <sup>2</sup> d atm 500-640 cm <sup>3</sup> mil / 100 in <sup>2</sup> d atm
Absorción del agua	0.5 mg/a 96 h

Fuente: Quintana, 2007.

#### A. HDPE - Características Generales

- ✓ Resistente a las bajas temperaturas.
- ✓ Alta resistencia a la tensión; compresión, tracción.
- ✓ Baja densidad en comparación con metales u otros materiales.
- ✓ Impermeable
- ✓ Inerte (al contenido), baja reactividad;
- ✓ No tóxico.

#### B. HDPE - Características Industriales

- ✓ Baja Permeabilidad
- ✓ Los recubrimientos de HDPE son seguros ya que no los penetra la lixiviación.
- ✓ No existen fugas de gas en sistemas sellados en HDPE.
- ✓ Impermeables la lluvia o líquidos, que no pueden infiltrarse en una cobertura de HDPE.

#### C. Resistencia Química

- ✓ El HDPE es resistente a agentes químicos.
- ✓ No es corroído por desechos de lixiviación sólidos o tóxicos. Por lo mismo su uso es recomendable para contenedores de depósitos químicos.

(<http://www.oban.cl/difusion-HDPE-descubrimiento-utilizacion-propiedades.htm>)

**Anexo 04:** imágenes de la investigación realizada.



Imagen 1: Construcción de trípodes



Imagen 2: Preparación de soluciones



Imagen 3: Cama de papel de nitrocelulosa colocado en el pote con cierre hermético



Imagen 4: Pesado del recipiente contenedor de los granos de kiwicha



Imagen 5: Pesado de las muestras de kiwicha



Imagen 6: Reporte de datos