

## PROPIEDADES DE ADSORCIÓN DE AGUA DE DOS GENOTIPOS DE ARROZ ROJO

Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n1p134-143/2015>

DIEGO P. R. ASCHERI<sup>1</sup>, SUELY M. C. BASTOS<sup>2</sup>

**RESUMEN:** A pesar de ser una plaga en el cultivo del arroz blanco, el arroz rojo (*Oryza sativa* L.) es muy apreciado por su valor nutritivo, sabor, textura y propiedades benéficas. Sus propiedades de adsorción de agua aún no han sido elucidadas, por ese motivo, el objetivo del presente trabajo fue estudiar las propiedades de adsorción de agua de dos genotipos de arroz rojo PB01 y PB05. Fueron utilizados granos de arroz en cáscara con tenor de agua inicial de  $2 \text{ dag}_a \text{ kg}_{\text{ms}}^{-1}$  sometidos a proceso de adsorción en  $0.113 \leq A_w \leq 0.973$  y temperaturas de 30, 50 y 70 °C. Los modelos de Peleg, GAB y Clausius-Clapeyron fueron usados para predecir las variaciones de la humedad de equilibrio en función del tiempo, las isotermas y estabilidad y el calor isostérico de adsorción de agua, respectivamente. Estos modelos matemáticos se adecuaron bien a los datos experimentales, presentando  $R_{aj}^2 > 97\%$  y  $SE < 0.7 \text{ dag kg}^{-1}$ . La tasa inicial y la capacidad de adsorción de agua aumentaron exponencialmente en función de  $A_w$ . Las isotermas, la estabilidad y el calor isostérico del arroz rojo dependen de las características de cada genotipo. El genotipo PB01 es más estable entre 30 y 50 °C y el PB05 entre 50 y 70 °C.

**PALABRAS CLAVE:** *Oryza sativa*, isotermas, calor isostérico, estabilidad, actividad de agua, cinética de adsorción de agua.

## PROPRIEDADES DE ADSORÇÃO DE ÁGUA DE DOIS GENÓTIPOS DE ARROZ VERMELHO

**RESUMO:** Apesar de ser uma praga na lavoura do arroz branco, o arroz vermelho (*Oryza sativa* L.) é muito apreciado por seu valor nutritivo, sabor, textura e propriedades benéficas. Suas propriedades de adsorção ainda são desconhecidas; por esse motivo, o objetivo deste trabalho foi estudar essas propriedades em dois genótipos de arroz vermelho: PB01 e PB05. Foram utilizados grãos de arroz em casca com teor de água inicial de  $2 \text{ dag}_a \text{ kg}_{\text{ms}}^{-1}$ , submetidos a processo de adsorção em  $0.113 \leq A_w \leq 0.973$  e temperaturas de 30; 50 e 70 °C. Os modelos de Peleg, GAB e Clausius-Clapeyron foram usados para prever as variações do teor de água de equilíbrio em função do tempo, as isotermas e a estabilidade e o calor isostérico, respectivamente. Estes modelos matemáticos adequaram-se bem aos dados experimentais, apresentando  $R_{aj}^2 > 97\%$  e  $SE < 0.7 \text{ dag kg}^{-1}$ . A taxa inicial e a capacidade de adsorção de água (coeficientes do modelo de Peleg) aumentam exponencialmente em função da  $A_w$ . As isotermas, a estabilidade e o calor isostérico do arroz vermelho dependem das características de cada genótipo. O genótipo PB01 é mais estável entre 30 e 50 °C e o PB05 entre 50 e 70 °C.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Oryza sativa*, isotermas, calor isostérico, estabilidade, atividade de água, cinética de adsorção de água.

<sup>1</sup> Eng° de Alimentos, Prof. Doutor, Curso de Mestrado de Engenharia Agrícola, UEG/Anápolis – GO, Fone: (62) 3328-1156, ascheridpr@gmail.com.

<sup>2</sup> Licenciada em Matemáticas, Profa. Mestre, Curso de Matemáticas, UEG/Anápolis – GO, Fone: (62) 3328-1156, suelymcavalcante@gmail.com.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 21-11-2011

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 08-8-2014

## INTRODUCCIÓN

El arroz rojo pertenece a la misma especie botánica del arroz blanco (*Oryza sativa* L.), sin embargo, en los cultivos de arroz comercial, él es considerado una maleza por causar considerables perjuicios, principalmente por comprometer la calidad del producto final (SANTOS et al., 2007).

Aunque sea abundante la literatura sobre su control con la tentativa de eliminarlo de los cultivos de arroz blanco (SANTOS et al., 2007; VIGANO & RAETANO, 2007), por su sabor, textura y propiedades benéficas, el arroz rojo (*Oryza sativa* L.) es cultivado por lo menos en cuatro continentes (PEREIRA et al., 2009). En algunas regiones del Brasil es considerado uno de los principales componentes de la dieta (PEREIRA et al., 2007). En Japón, este tipo de arroz es apreciado por sus propiedades antioxidantes y se utiliza en la elaboración de fideos coloridos, tortas, bebidas alcohólicas, etc.

Aunque el arroz rojo es más nutritivo que el arroz blanco, son raros los estudios realizados con ese tipo de arroz. BOÊNO et al. (2011), en el estudio de cuatro genotipos de arroz rojo para verificar su adaptación a las exigencias del mercado consumidor, se demostró que el genotipo hace la diferencia en sus propiedades fisicoquímicas y en las características deseadas en relación a la calidad tecnológica.

Estas características pueden ser influenciadas por las condiciones ambientales en que es producido o factores cruciales para su conservación; a temperaturas y humedades relativas (HR) elevadas pueden causar proliferación de microorganismos, pero con HR bajas los granos pueden perder su plasticidad y quebrar durante su procesamiento. Por tanto, es necesario estudiar las condiciones utilizadas para su almacenamiento adecuado o, mismo, adquirir datos que permitan la predicción del buen acondicionamiento de los granos de arroz rojo durante este proceso.

Las propiedades de adsorción de agua relacionan la humedad y la energía del producto en determinadas condiciones de humedad relativa y temperatura; además infieren la cantidad de energía utilizada para conservar el producto en un ambiente adecuado por periodos de tiempo prolongados.

El calor isostérico es la propiedad termodinámica fundamental en el análisis de la exigencia energética y la predicción de los parámetros cinéticos en los procesos de adsorción y desorción (KAYA & KAHYAOGU, 2006). Este tipo de energía se usa como un indicador del tipo de agua (libre o de estructuración) presente en el alimento de acuerdo con las fuerzas intermoleculares entre las moléculas de agua y los sitios de adsorción. También indica la cantidad teórica mínima requerida de energía para eliminar una cantidad de agua en el producto y se utiliza para proyectar secadores capaces de generar energía mayor que la entalpía de vaporización del agua pura, para secar el material en bajos niveles de humedad (MADAMBA et al., 1996).

El objetivo del presente trabajo fue contribuir con las propiedades de adsorción de agua de dos genotipos de arroz rojo en cáscara, PB01 y PB05 a partir de la adsorción de agua en función del tiempo, a las temperaturas de 30, 50 y 70 °C y actividades de agua que variaron de 0.113 a 0.973.

## MATERIAL Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el Laboratorio de Propiedades Físicas de Productos Vegetales de la Unidad Universitaria de Ciencias Exactas y Tecnológicas de la Universidad Estatal de Goiás (Anápolis-GO, Brasil).

Previamente almacenados por aproximadamente 60 días, 10 kg de los genotipos de arroz rojo en cáscara PB01 y PB05 fueron donados por el Programa de Mejoramiento Genético de Arroz Rojo de la Embrapa Meio-Norte (Teresina-PI, Brasil). Para obtener las muestras, se sometió 150 g del producto al secado en estufa con recirculación de aire (Marconi, modelo MA03/5, Brasil), a 60 °C por 7 días (d) hasta alcanzar una humedad de aproximadamente 2 dag de agua por kg de materia seca ( $\text{dag}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ ).

El diseño experimental fue completamente al azar con tres repeticiones, y el proceso de adsorción se dio usando la técnica de ASCHERI et al. (2009). Las soluciones saturadas de sales (Tabla 1) fueron colocados en frascos de vidrio (capacidad de 1 L) que cuando tapados herméticamente generaron ambientes con diferentes valores de actividad de agua ( $A_w$ ), variando de 0.113 a 0.973, en temperaturas de 30, 50 y 70 °C.

La masa de las muestras se detectó en balanza semi analítica (Gehaka, BG 400, Brasil) con precisión de 0.001 g, cada 24 h, hasta no haber variación de masa. La humedad de las muestras ( $X_t$ , en  $\text{dag}_a \text{ kg}_{\text{ms}}^{-1}$ ) para un determinado tiempo de adsorción, se calculó con:

$$X_t = \frac{m_t - m_i}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

en que,

$m_i$  - masa inicial de la muestra,  $\text{kg}_{\text{ms}}$ , y

$m_t$  - masa de la muestra para un determinado tiempo de adsorción, kg en base húmeda.

El modelo de Peleg [ec. (2)] (PELEG, 1988) fue transformado a su forma lineal [ec. (3)] y ajustado a los datos de cinética de adsorción de agua:

$$X_t = X_0 + \frac{t}{r_1 + r_2 t} \quad (2)$$

en que,

$X_0$  - humedad inicial de las muestras,  $\text{dag}_a \text{ kg}_{\text{ms}}^{-1}$ ;

$t$  - tiempo, h, y

$r_1$  y  $r_2$  - tasa de adsorción,  $\text{h kg}_{\text{ms}} \text{ dag}_a^{-1}$ , y capacidad de adsorción,  $\text{kg}_{\text{ms}} \text{ dag}_a^{-1}$ , constantes de Peleg calculados por medio del modelo linealizado de Peleg [ec. (3)].

$$\frac{t}{X_t - X_0} = r_1 + r_2 t \quad (3)$$

De acuerdo con PELEG (1988), la capacidad máxima de adsorción o, mejor dicho, la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) puede ser obtenida por la propia [ec. (2)] cuando el tiempo tiende al infinito, resultando en:

$$X_e = X_0 + \frac{1}{r_2} \quad (4)$$

Note que  $X_0$  es igual a cero, por lo tanto  $X_e = \frac{1}{r_2}$ .

Se realizó un análisis de regresión no lineal (método Quasi-Newton) con los valores calculados de  $X_e$  en función de  $A_w$  utilizando el modelo de GAB:

$$X_e = \frac{X_m C k A_w}{(1 - k A_w)(1 - k A_w + C k A_w)} \quad (5)$$

en que,

$X_m$  - humedad de equilibrio en la monocapa ( $\text{dag kg}^{-1}$ ), y

$C$  y  $k$  - constantes del modelo de GAB.

El ajuste del modelo de GAB y Peleg fue evaluado por medio del coeficiente de determinación ajustado ( $R_{aj}^2$ , en porcentaje) y por medio del error estándar del estimado (SE, en  $\text{dag}_a \text{kg}_{ms}^{-1}$ ).

El calor isostérico ( $Q_{st}$ ), en  $\text{kJ mol}^{-1}$  se determinó con la [ec. (6)]. El calor latente de vaporización del agua pura ( $\lambda_{vap}$ ), se obtuvo con la [ec. (7)], a la temperatura [T, en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ )] de  $70^{\circ}\text{C}$ :

$$Q_{st} = q_{st} + \lambda_{vap} \quad (6)$$

$$\lambda_{vap} = 44.72 - 0.03T - 9.2 \times 10^{-5} T^2 \quad (7)$$

El calor líquido de adsorción ( $q_{st}$ ), en  $\text{kJ mol}^{-1}$ , se calculó con la ecuación de Clausius-Clapeyron:

$$\left[ \ln \left( \frac{A_{w1}}{A_{w2}} \right) = \frac{-q_{st}}{R} \cdot \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right]_{X_e} \quad (8)$$

Los valores de  $A_w$  para cada temperatura se calcularon usando la [ec. (5)]. El coeficiente angular de la recta  $\ln(A_w)$  versus  $T^{-1}$  para  $X_e$  constante es igual al cociente entre el calor líquido de adsorción y la constante universal de los gases ( $q_{st}/R$ ).

Se realizaron las curvas de  $Q_{st}$  en función de  $X_e$ , con valores de  $X_e \geq 5.0 \text{ dag kg}^{-1}$ , por medio de regresión no lineal (método Quasi-Newton) ( $p \leq 0.05$ ) con una ecuación exponencial:

$$Q_{st} = \lambda_{vap} + a \exp(-b X_e) \quad (9)$$

en que,

a y b - parámetros de ajuste de la ecuación exponencial.

Los análisis de regresión y las estadísticas se efectuaron con el programa *Statistica* 8.0 (STATSOFT, 2007), con 95% de confianza.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos experimentales de la adsorción de agua de los granos de arroz rojo estudiados, obtenidos en diferentes valores de actividad de agua y temperaturas, en función del tiempo, fueron transformados usando el modelo linealizado de Peleg y se muestran en la Figura 1.

El modelo linealizado de Peleg se ajustó bien a los datos experimentales demostrado por la correspondencia observada entre los resultados y valores estimado por el modelo para todas las actividades de agua y temperaturas de adsorción (Figura 1), y por los valores de las estadísticas  $R_{aj}^2$  y SE calculadas (Tabla 1). Los valores de  $R_{aj}^2$  fueron superiores de 97% y de SE fueron inferiores de  $2 \text{ dag kg}^{-1}$ , infiriendo una buena adecuación del modelo a los datos experimentales.

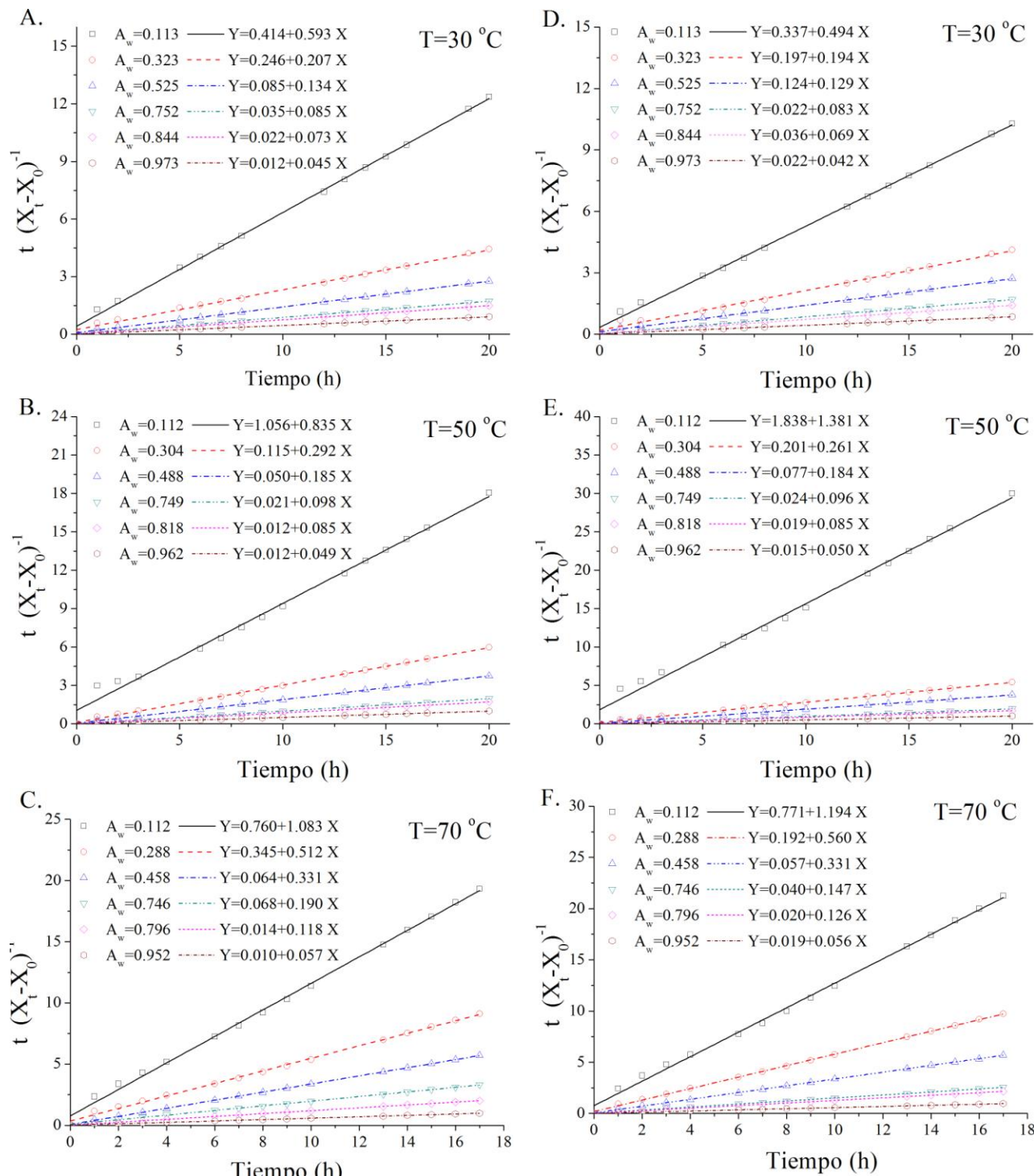


FIGURA 1. Valores de la humedad de equilibrio de arroz rojo transformados por el modelo linealizado de Peleg en función del tiempo, obtenidos en diferentes actividades de agua ( $A_w$ ) y temperaturas. Los gráficos de A a C y de D a F corresponden a los genotipos de arroz rojo PB01 y PB05, respectivamente.

La Tabla 1 también pone en manifiesto los coeficientes  $r_1$  y  $r_2$  del modelo de Peleg, obtenidos por la ec. (3). La constante  $r_1$  está relacionada con la tasa de transferencia de masa, cuanto menor esta constante mayor es la tasa inicial de adsorción de agua. El  $r_2$  se refiere a la capacidad máxima de adsorción, es decir, a la cantidad de agua adsorbida en condiciones de humedad y temperatura controladas.

El  $r_1$  y el  $r_2$  se relacionan exponencialmente con la actividad de agua, explicada por la ecuación tipo  $r = a \exp(b A_w)$  que se adecuó bien presentando valores de  $R_{aj}^2$  mayores de 97% y

SE menores de  $0,13 \text{ dag kg}^{-1}$ . Ellos disminuyeron con el aumento de  $A_w$ , en todas las temperaturas estudiadas, indicando que la cantidad de agua adsorbida por el arroz rojo en un tiempo determinado es mayor cuanto mayor es la actividad de agua del sistema de adsorción.

Estos coeficientes  $r_1$  y  $r_2$  presentaron fluctuaciones aleatorias entre las temperaturas estudiadas. Resultados semejantes fueron obtenidos por BOTELHO et al. (2010) en el análisis de la hidratación del arroz en la parbolización, por CORZO et al. (2008) en la aplicación del modelo de Peleg en el estudio de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de láminas de mamey (*Mammea americana* L.)

TABLA 1. Actividades de agua generadas en diferentes soluciones de sales saturadas y temperaturas de adsorción, coeficientes y parámetros estadísticos del modelo linealizado de Peleg, y humedades de equilibrio ( $X_e$ ) de los genotipos de arroz rojo en cáscara PB01 y PB05.\*

Sal	$A_w$	PB01						PB05					
		$r_1$	$r_2$	$X_e$	$R_{aj}^2$	P	SE	$r_1$	$r_2$	$X_e$	$R_{aj}^2$	P	SE
A la temperatura de 30 °C													
LiCl	0.113	0.414	0.337	0.593	0.494	1.69	2.02	99.81	99.78	2.871	3.544	0.112	0.113
MgCl <sub>2</sub>	0.323	0.246	0.197	0.207	0.194	4.82	5.15	99.48	99.09	3.896	5.507	0.063	0.098
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.525	0.085	0.124	0.134	0.129	7.46	7.73	99.85	99.63	2.650	3.501	0.023	0.034
NaCl	0.752	0.035	0.022	0.085	0.083	11.82	11.99	99.95	99.95	2.969	2.216	0.014	0.009
KCl	0.844	0.022	0.036	0.073	0.069	13.61	14.53	99.95	99.78	2.144	3.432	0.008	0.018
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.973	0.012	0.022	0.045	0.042	22.21	23.95	99.91	99.88	3.310	2.570	0.008	0.006
A la temperatura de 50 °C													
LiCl	0.112	1.056	1.838	0.835	1.381	1.20	0.72	99.08	99.11	4.949	5.031	0.376	0.575
MgCl <sub>2</sub>	0.304	0.115	0.201	0.292	0.261	3.43	3.84	99.86	99.80	3.516	2.638	0.057	0.044
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.488	0.050	0.077	0.185	0.184	5.41	5.43	99.98	99.91	1.460	2.608	0.013	0.026
NaCl	0.749	0.021	0.024	0.098	0.096	10.24	10.37	99.98	99.98	1.621	1.382	0.008	0.007
KCl	0.818	0.012	0.019	0.085	0.085	11.74	11.73	99.98	99.98	1.452	1.237	0.006	0.006
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.962	0.012	0.015	0.049	0.050	20.32	19.96	99.98	99.94	1.395	2.319	0.003	0.006
A la temperatura de 70 °C													
LiCl	0.112	0.760	0.771	1.083	1.194	0.92	0.84	99.70	99.68	3.626	4.164	0.241	0.299
MgCl <sub>2</sub>	0.288	0.345	0.192	0.512	0.560	1.95	1.79	99.70	99.93	3.666	2.221	0.116	0.065
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.458	0.064	0.057	0.331	0.331	3.02	3.02	99.96	99.95	1.637	2.255	0.025	0.034
NaCl	0.746	0.068	0.040	0.190	0.147	5.27	6.79	99.92	99.94	2.198	2.037	0.022	0.016
KCl	0.796	0.014	0.020	0.118	0.126	8.50	7.96	99.99	99.95	1.077	2.220	0.006	0.013
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.952	0.010	0.019	0.057	0.056	17.52	17.96	99.95	99.91	1.988	2.662	0.006	0.008

\* Medias obtenidas de tres repeticiones;  $A_w$ = actividad de agua (unidades adimensionales);  $r_1$ = tasa constante de Peleg ( $\text{h kg}_{\text{ms}} \text{dag}_{\text{a}}^{-1}$ );  $r_2$ = capacidad constante de Peleg ( $\text{kg}_{\text{ms}} \text{dag}_{\text{a}}^{-1}$ );  $X_e$ = humedad de equilibrio ( $\text{dag kg}^{-1}$ );  $R_{aj}^2$ = coeficiente de determinación ajustado (%); P= error medio relativo (%); SE= error estándar del estimado ( $\text{dag kg}^{-1}$ ).

Los valores de la humedad de equilibrio calculada por el inverso de  $r_2$  también constan en la Tabla 1. Las isothermas originadas (Figura 2) tienen forma sigmoideal del tipo II de acuerdo con la clasificación de la IUPAC. En las isothermas se observa que para temperaturas constantes, la humedad de equilibrio aumenta con el incremento de la actividad de agua. También, para cualquier valor constante de  $A_w$ , el valor de  $X_e$  disminuye con el aumento de la temperatura. GOULA et al. (2008) sugieren que este fenómeno se debe a la reducción de los sitios de adsorción por causa de las variaciones físicas o químicas del alimento inducidas por la temperatura. Esta última suposición parece ser el caso del presente estudio, pues la cáscara de los granos de arroz rojo se constituye principalmente de compuestos químicos poco solubles en agua como la celulosa (25-36%), hemicelulosa (18-22%) y lignina (18-25%), por ejemplo (VALVERDE et al., 2007).

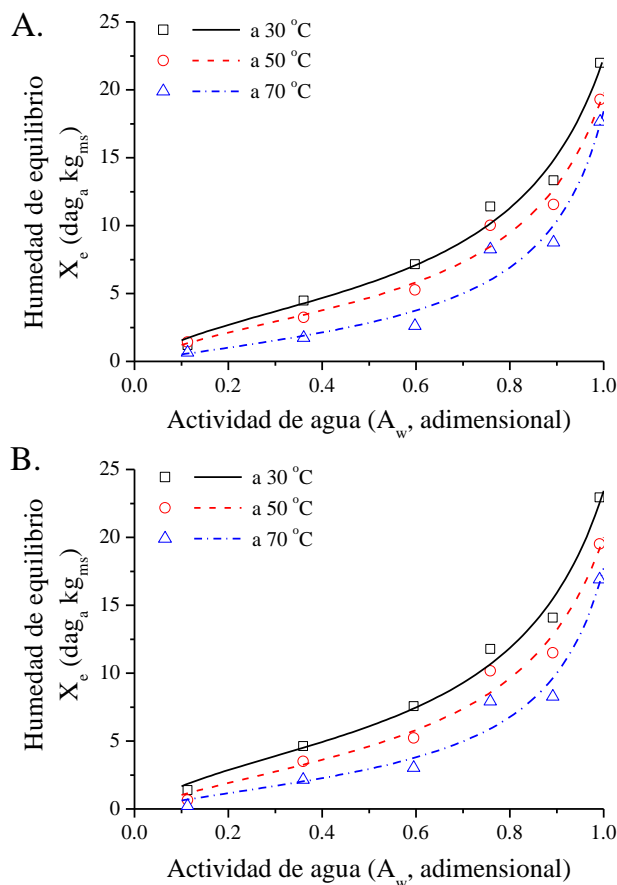


FIGURA 2. Isotermas de adsorción de agua de genotipos de arroz rojo en cáscara: A) PB01 y B) PB05, obtenidas en temperaturas de 30, 50 y 70 °C y actividad de agua entre 0.112 y 0.973.

De acuerdo con la prueba F (Tabla 2), el modelo de GAB se ajustó adecuadamente a las isotermas de la Figura 2, presentando valores de  $R_{aj}^2$  superiores a  $0.99 \text{ dag}^2 \text{ kg}^{-2}$  y SE inferiores de  $0.62 \text{ dag kg}^{-1}$ , por lo que se considera un modelo predictivo de la humedad de equilibrio del arroz rojo en condiciones trabajadas.

TABLA 2. Análisis estadístico y parámetros de las ecuaciones de GAB ajustado a las isotermas de adsorción de agua del arroz rojo con cáscara, genotipos PB01 y PB05, obtenidas en temperaturas de 30, 50 y 70 °C y actividad de agua entre 0.112 y 0.973.

G	T (°C)	Parámetros			F	$R_{aj}^2$	SE
		$X_m$	C	k			
PB01	30	4.88	5.06	0.81	2303.0*	99.9	0.61
	50	4.39	3.95	0.82	7015.5*	99.9	0.31
	70	4.48	1.13	0.83	188.6*	99.9	0.37
PB05	30	5.07	5.28	0.81	3219.1*	99.9	0.54
	50	4.64	3.20	0.81	4045.9*	99.9	0.41
	70	3.34	2.10	0.86	1659.3*	99.9	0.51

G - genotipos de arroz rojo; T- temperatura;  $X_m$ - humedad de equilibrio correspondiente a la monocapa ( $\text{dag kg}^{-1}$ ); C y k- constantes adimensionales; F- prueba F;  $R_{aj}^2$ - coeficiente de determinación ajustado (%); SE- error estándar del estimado ( $\text{dag kg}^{-1}$ ); \* Significativo ( $p \leq 0.01$ ).

Generalmente el coeficiente  $X_m$  del modelo de GAB es considerado como humedad de equilibrio donde el grano de arroz rojo puede permanecer más estable. En la Tabla 2 se observa que los valores de  $X_m$  de PB01 fluctúan aleatoriamente entre las temperaturas estudiadas. Resultados

semejantes fueron obtenidos por GOUVEIA et al. (2004) en isotermas de desorción de la pulpa de plátano maduro de la variedad *Prata*.

Entre las temperaturas de 30 a 50 °C  $X_m$ , para ambos genotipos, disminuyeron paralelamente, sin embargo, los mayores valores fueron registrados para PB05; entretanto, con el aumento de la temperatura de 50 a 70 °C, el  $X_m$  de PB05 continuó disminuyendo en cuanto que el de PB01 permaneció estable. Por tanto, se infiere que la estabilidad de los granos de arroz rojo en cáscara depende de las características inherentes de cada genotipo y de la temperatura de adsorción sometida y que PB05 puede permanecer más estable a temperaturas elevadas.

La variación de los valores del calor isostérico de adsorción de agua de ambos genotipos de arroz rojo (Figura 3), en función de la humedad de equilibrio, es concordante con los trabajos realizados por KAYA & KAHYA OGLU (2006), GABAS et al. (2007) y ASCHERI et al. (2009).

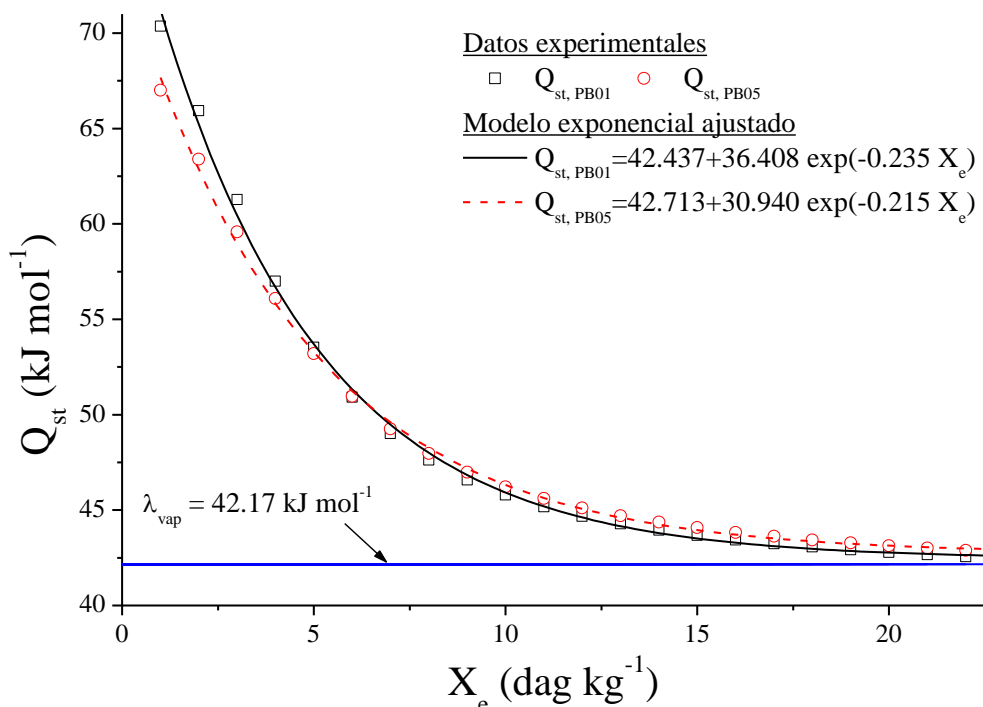


FIGURA 3. Calor isostérico de adsorción de agua ( $Q_{st}$ ) en función de la humedad de equilibrio ( $X_e$ ) de los genotipos de arroz rojo en cáscara PB01 y PB05.

La disminución acentuada de  $Q_{st}$  hasta valores de  $X_e$  cercanos a 7  $\text{dag}_a \text{ kg}_{ms}^{-1}$  y posteriormente moderada se explica por la intensidad de las fuerzas intermoleculares que existe entre el agua y los sitios activos y entre las moléculas de agua que constituyen la multicapa (AKAMBI et al., 2006). Mayores valores de  $Q_{st}$  verificada en bajas humedades de equilibrio indican la cantidad de calor que se necesita para remover las moléculas de agua en esos niveles de humedad de equilibrio. A medida que  $X_e$  aumenta,  $Q_{st}$  disminuye debido a la reducción de las fuerzas de interacción del agua con las demás moléculas del sistema de adsorción.

Los mayores valores de  $Q_{st}$  de PB01 en  $X_e \leq 3 \text{ dag kg}^{-1}$  comparado con PB05 infieren que los granos de arroz rojo en cáscara poseen  $Q_{st}$  variables en función del genotipo y del contenido de humedad de equilibrio.

El modelo exponencial [ec. (9)] se adecuó significativamente ( $R_{aj}^2 \approx 1$ ) a los datos del calor isostérico (Tabla 3). Aplicando la [ec. (9)] y los parámetros de la Tabla 3 para las medias geométricas de  $X_m$  de PB01 y PB05 (Tabla 2), se obtuvieron calores isostéricos de 54.86 y 55.04  $\text{kJ mol}^{-1}$ , respectivamente, indicando que es necesaria una energía aproximadamente de 55  $\text{kJ mol}^{-1}$  para mantener la humedad del arroz rojo PB01 y PB05 en niveles próximos a la humedad de



equilibrio de la monocapa para que los arroces permanezcan con buena estabilidad durante su almacenamiento.

TABLA 3. Parámetros de la ecuación del calor isostérico de adsorción de agua ( $Q_{st}$ ) de genotipos de arroz rojo en cáscara PB01 y PB05.

Genotipo	Coeficientes			$R_{aj}^2$
	$\lambda_{vap}$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	a	b	
PB01	42.437	36.408	0.235	99.80
PB05	42.710	30.940	0.215	99.90

$\lambda_{vap}$ - calor latente de vaporización del agua pura; a, b- constantes de la ecuación exponencial;  $R_{aj}^2$ - coeficiente de determinación ajustado.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados encontrados en el presente trabajo, fue posible concluir que las características de adsorción de agua de los genotipos de arroz rojo en cáscara PB01 y PB05 pueden ser descritas por el modelo de Peleg; la tasa inicial y la capacidad de adsorción de agua aumentan exponencialmente en función de la actividad de agua. El modelo de GAB se adecua bien para la descripción de las curvas de humedad de equilibrio, cuya estructura es sigmoideal del tipo II; en valores constantes de actividad de agua, presenta proporcionalidad negativa frente a la temperatura.

La estabilidad de los granos de arroz rojo en cáscara depende de las características inherentes de cada genotipo estudiado y de la temperatura de adsorción usada; la estabilidad aumenta con el aumento de la temperatura y PB01 es más estable en temperaturas de 30 y 50 °C, mientras que PB05 en temperaturas elevadas (50 a 70 °C).

El calor isostérico varía en función del genotipo de arroz rojo en cáscara y con el contenido de humedad de equilibrio; se relacionan exponencialmente con la humedad de equilibrio. PB05 necesita menor energía para adsorber humedad, por lo que posee mayor afinidad por el agua que PB01.

## REFERÊNCIAS

AKANBI, C.T.; ADEYEMI, R.S.; OJO, A. Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *Journal of Food Engineering*, Davis, v.73, n.2, p.157–163, 2006.

ASCHERI, D.P.R.; MOURA, W.S.; ASCHERI, J.L.R.; JUNIOR, E.A.F. Propriedades termodinâmicas de adsorção de água do amido de rizomas do lírio-do-brejo (*Hedychium coronarium*). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.29, n.2, p.454-462, 2009.

BOÊNÔ, J.A.; ASCHERI, D.P.R.; BASSINELLO, P.Z. Qualidade tecnológica de grãos de quatro genótipos de arroz-vermelho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.15, n.7, p.718–723, 2011.

BOTELHO, F.M.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; MARTINS, M.A.; BAPTESTINI, F.M. Análise da hidratação do arroz na parboilização. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.30, n.3, p.713-718, 2010.

CORZO, O.; RAMÍREZ, O.; BRACHO, N. Aplicación del modelo de Peleg en el estudio de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de láminas de mamey (*Mammea americana* L.). *Saber*, Venezuela, v.20, n.1, p. 87-95, 2008.

GABAS, A.L.; TELIS, V.R.N.; SOBRAL, P.J.A.; TELIS-ROMERO, J. Effect of maltodextrin and arabic gum in water vapor sorption thermodynamic properties of vacuum dried pineapple pulp powder. *Journal of Food Engineering*, Davis, v.82, n.2, p.246-252, 2007.

- GOULA, A.M.; KARAPANTSIOS, T.D.; ACHILIAS, D.S.; ADAMOPOULOS, K.G. Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. *Journal of Food Engineering*, Davis, v.85, n.1, p.73–83, 2008.
- GOUVEIA, J.P.G. de; NASCIMENTO, J. do; ALMEIDA, F. de A.C.; SILVA, M.M. da; FARIAS, E. da S.; SILVA, F.L.H. da. Modelos matemáticos para ajuste das isotermas de dessorção da polpa de banana da variedade prata. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.24, n.3, p.799-806, 2004.
- KAYA, S.; KAHYAOGU, T. Influence of dehulling and roasting process on the thermodynamics of moisture adsorption in sesame seed. *Journal of Food Engineering*, Davis, v.76, n.2, p.139-147, 2006.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Enthalpy-entropy compensation models for sorption and browning of garlic. *Journal of Food Engineering*, Davis, v.28, n.2, p.109-119, 1996.
- PELEG, M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, Chicago, v.52, n.4, p.1216-1219, 1988.
- PEREIRA, J.A.; BASSINELLO, P.Z.; CUTRIM, V. dos A.; RIBEIRO, V.Q. Comparação entre características agrônômicas, culinárias e nutricionais em variedades de arroz branco e vermelho. *Caatinga*, Mossoró, v.22, n.1, p.243-248, 2009.
- PEREIRA, J.A.; BASSINELLO, P.Z.; FONSECA, J.R.; RIBEIRO, V.Q. Potencial genético de rendimento e propriedades culinárias do arroz vermelho cultivado. *Caatinga*, Mossoró, v.20, n.1, p.43-48, 2007.
- SANTOS, F.M.; MARCHESAN, E.; MACHADO, S.L.O.; VILLA, S.C.C.; AVILA, L.A.; MASSONI, P.F.S. Controle químico de arroz-vermelho na cultura do arroz irrigado. *Planta Daninha*, Viçosa, MG, v.25, n.2, p.405-412, 2007.
- STATSOFT. *Statistica (data analysis software system)*. Tulsa: StatSoft, 2007. v.8 1 CD ROOM.
- VALVERDE G.A.; SARRIA L.B.; MONTEAGUDO Y.J.P. Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica*, Risaralda, v.13, n.37, p.255-260, 2007.
- VIGANO, L.L.S.; RAETANO, C.G. Assistência de ar e volumes de aplicação na deposição de calda e no controle do arroz vermelho (*Oryza sativa* L.). *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, n.3, p.734-741, 2007.