

EVALUACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA EN GRANOS DE QUINUA (*Chenopodium quinoa Willd*) y CAÑIHUA (*Chenopodium pallidicaule Aellen*)

Evaluation of Thermal diffusivity in grain quinoa (Chenopodium quinoa Willd) and Cañihua (Chenopodium pallidicaule Aellen)

Nils Leander Huamán Castilla.¹, Walter Francisco Salas²

¹ Universidad Nacional de Moquegua, Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Moquegua – Perú

² Universidad Nacional Agraria de la Molina. Escuela de Post – Grado, Lima - Perú

*Autor para correspondencia, e-mail: nhuamanc@unam.edu.pe

RESUMEN

Las propiedades físicas y térmicas de los alimentos juegan un papel importante en el diseño y construcción de equipos. En este trabajo se reporta mediciones de difusividad térmica en 2 tipos de granos andinos de quinua (*Chenopodium quinoa Willd*) y cañihua (*Chenopodium pallidicaule Aellen*) en sus variedades INIA – Salcedo, Blanca de July y Cupi, Ramis respectivamente. El método empleado fue el de curvas de penetración de calor en un equipo especialmente armado para este fin. Los resultados obtenidos indican que los valores varían entre 7.5 y $8.9 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Existen diferencias estadísticamente significativas entre los 2 tipos de granos, lo que indica que la humedad, temperatura influyen directamente en esta propiedad térmica.

Palabras clave: Granos andinos, quinua, cañihua, difusividad térmica, propiedades térmicas.

ABSTRACT

The physical and thermal properties of foods play an important role in the design and construction of equipment. In this work we report measurements of thermal diffusivity in two types of Andean grain quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) and cañihua (*Chenopodium pallidicaule Aellen*) in its varieties INIA - Salcedo, July and Cupi, Ramis respectively. The method used was to heat penetration curves on a specially reinforced for this purpose. The results indicate that the values vary between 7.5 y $8.9 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Statistically significant differences between the 2 types of grains, indicating that moisture, temperature and heat treatment directly influence the thermal property.

Keywords: Grains andeans, quinoa, cañihua, thermal diffusivity, thermal properties

INTRODUCCIÓN

A fin de incrementar y en su caso mantener el contenido de reservas orgánicas del suelo, se ha promovido el uso de insumos orgánicos por el efecto positivo que esto conlleva, como es el caso del incremento de la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo, mayor resistencia contra la erosión, y aporte nutrimental edáfico, entre otros (Tate, 1987). El uso eficiente los residuos orgánicos puede obtenerse con un mejor entendimiento de los factores que afectan los procesos de descomposición y liberación de nutrimentos, a través del estudio de la interacción del residuo orgánico y el suelo.

La mineralización del nitrógeno de los residuos orgánicos, es un proceso que para cuantificarlo requiere en ocasiones de períodos prolongados de tiempo, por ejemplo, cuando se realiza a través de incubaciones bajo condiciones controladas. La determinación del C soluble se realizó a fin de obtener un indicador de rápida y práctica medición de las reservas contenidas en el suelo, ya que este se relaciona con las reservas orgánicas activas que varían según la cantidad y calidad del material orgánico presente, como mencionan Fox y Piekielek (1978). Sin embargo, el uso de esta herramienta ha sido escasamente estudiada. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue determinar la relación del C soluble con la mineralización del nitrógeno en Alfisoles, del estado de Campeche, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

La materia prima utilizada fue 10 kg de granos lavados de cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen), de las variedades Cupi (5 kg) y Ramis (5 kg), y 10 kg de granos lavados de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) de las variedades INIA Salcedo (5 kg) y Blanca de July (5 kg), los granos fueron adquiridos del almacén de semillas del Instituto Nacional de Investigación Agraria INIA, Estación Experimental Rinconada – Salcedo - Puno. Los granos fueron acondicionados a contenidos de humedad de 10, 15 y 20%, de acuerdo a la siguiente Ecuación propuesta por Carman (1996):

$$Y = \left(\frac{X_f MS}{1 - X_f} - X_o \right) \times 1.05 \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde, Y = masa de agua a adicionar para lograr el nuevo contenido de humedad (g), Xo= masa de agua en el grano (g), Xf= contenido de humedad deseado (%), MS= masa seca de grano (g).

Los granos acondicionados fueron evaluados en sus propiedades físicas: la gravedad específica se determinó mediante la balanza MohrWestphal tipo LB 502 (Mohsenin, 1986), la densidad real se calculó a partir de la gravedad específica (Alvarado y Aguilera, 2001), la densidad aparente fue determinada por el método de desplazamiento de volumen (Lewis, 1993), a partir de estos datos se determinó la porosidad como una relación de la densidad real entre su densidad aparente (Lewis, 1993).

La difusividad térmica: fue determinada en un equipo especialmente armado por Ureña (1990), que consiste en un cedula cilíndrica 250 mm de longitud y 48 mm de diámetro interno, con un espesor de pared aproximado a 1 mm. El cual está inmerso dentro de otro cilindro de mayor diámetro. En ambos extremos la cedula tiene tapones de teflón que la sellan herméticamente, el espacio dejado por ambos cilindros es por donde circula el agua a una temperatura constante. Uno de los tapones tiene un agujero con hilo de tornillo en el centro, por donde se introduce y se sujeta el sensor llamado Micropack, que forma parte del módulo de interfase denominado DATATRACE TEMP, el cual con ayuda de un software de aplicación y un ordenador completan el sistema de adquisición de datos, la termocupla del sensor, cuyo extremo llega al centro geométrico del cilindro, y por donde se registra la temperatura de la muestra que es colocada en el interior del cilindro, la Figura 1 muestra el esquema del equipo:

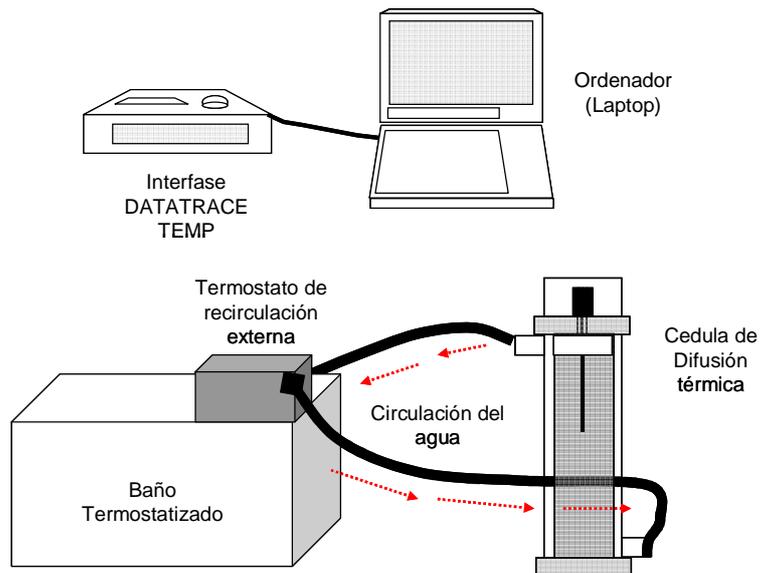


Figura 1. Esquema del cilindro empleado para la medición de la difusividad térmica.

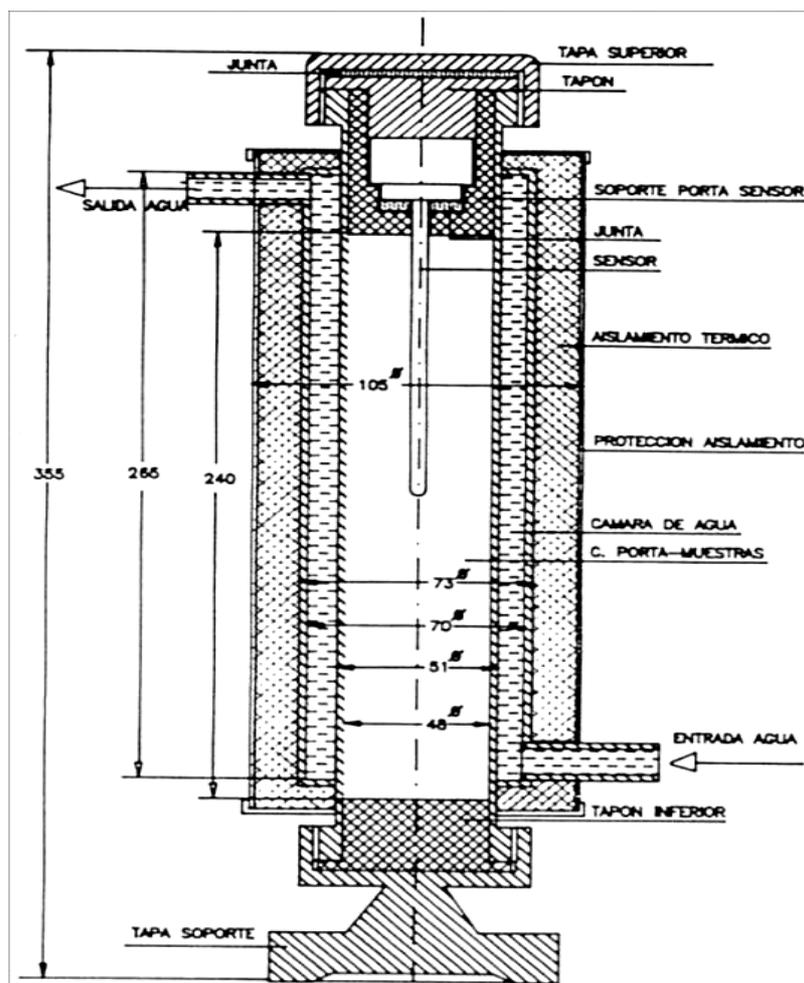


Figura 2. Esquema de la cedula cilíndrica para la medición de difusividad térmica (Ureña, 1990).

Los granos andinos acondicionados a 10, 15 y 20% de humedad fueron introducidos en la cedula cilíndrica. Un sensor registra la señal de variación de temperatura en función del tiempo (precisión de $\pm 0,05$ °C), los granos fueron evaluados a 25, 30 y 35°C en su difusividad térmica. Se registraron 30 datos por segundo, la Figura 2 muestra la cedula cilíndrica empleada. La ecuación general de transferencia de calor, es la siguiente:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \text{Ec. 2}$$

Partiendo de esta Ecuación 2, se obtiene una nueva Ecuación 3, que nos permite obtener los perfiles de temperatura para una lámina y cilindro finito (Carslaw y Jaeger; Ball y Olson, citados por Singh, 1982). Las soluciones analíticas son soluciones de serie que contienen exponenciales, seno y funciones trascendentales. Para un cilindro finito a una temperatura inicial uniforme, expuesto a una temperatura ambiental constante y con superficie con resistencia a la convección despreciable, la solución propuesta por (Carslaw y Jaeger, 1959) es la siguiente:

$$\frac{T_s - T}{T_s - T_i} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{m+1}}{\beta_m} \cos(\beta_m 2x/l) \frac{2J_0(\beta_n r/R)}{\beta_n J_1(\beta_n)} \exp\left[-\left(\frac{\beta_n^2}{R^2} + \frac{4\beta_m^2}{l^2}\right)\alpha t\right] \quad \text{Ec. 3}$$

Donde, T_s : Temperatura del medio circundante, T_i : Temperatura inicial, x : Coordenada rectangular, l : Longitud del cilindro finito, J_0 : Función Bessel de primer clase de orden cero, J_1 : Función Bessel de primer clase de orden uno, R : Radio en (m), β_n : Raíz de la función Bessel, β_m : Raíz de la función coseno, t : Tiempo (s), r : Coordenada radial y α : Difusividad térmica. Para situaciones donde la muestra es expuesta por un período prolongado de tiempo, solo el primer término de la solución por series es necesario. Para un objeto finito de forma cilíndrica, la solución expresada por la Ecuación 3, puede ser simplificada de la siguiente manera,

considerando que $m = n = 1$; es decir, $\beta_m = \beta/2$, $\beta_n = 2,4048$, y $J_1(2,4048) = 0,5191$. En el centro del objeto cilíndrico, $x = 0$, $r = 0$, y $J_0(0) = 1,0$. De esta manera la solución aproximada para largos períodos de tiempo es expresada como (Carslaw y Jaeger, 1959):

$$\frac{T_s - T}{T_s - T_i} = 2,0396 \exp\left[-\left(\frac{2,4048^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{\ell^2}\right)\alpha t\right] \quad \text{Ec. 4}$$

Cuando se grafican las curvas de penetración de calor experimentales sobre papel semi-logarítmico, es posible expresar la Ecuación 4 según Ball y Olson (1957) como:

$$t = f_h \log\left(j \frac{T_s - T_i}{T_s - T}\right) \quad \text{Ec. 5}$$

Dónde: $f_h = 0,398 \frac{r^2}{\alpha}$ es el parámetro de la curva de calentamiento y $j = 1,6$; para el caso de un cilindro infinito. La pendiente de la curva $t = \log(T)$, permite determinar el valor de f_h , reemplazando términos en la Ecuación 5. Se obtiene:

$$t = 0,398 \frac{r^2}{\alpha} \log\left[1,6 \frac{T_a - T_0}{T_a - T}\right] \quad \text{Ec. 6}$$

A partir de la Ecuación 6, podemos calcular la difusividad térmica como:

$$\alpha = \frac{0,398 r^2}{f_c} \quad \text{Ec. 7}$$

Los resultados de difusividad térmica de los granos andinos fueron analizados estadísticamente empleando un arreglo multifactorial y se realizó la prueba de comparación múltiple de Tukey para observar la existencia de grupos homogéneos de datos.

RESULTADOS Y DISCUSION

El contenido de humedad inicial para los granos de quinua y cañihua estuvo en un promedio de 8%, Mujica (2001) indica que después del trillado y secado del grano andino para su almacenamiento, su contenido de humedad varía de 15 a 12 %. Sin embargo una vez que el grano es procesado se presenta un contenido de humedad menor al 10% debido a un período de secado de 72 horas expuestos al ambiente (18 – 22°C), este descenso se debe a la ausencia del perigonio eliminado en la etapa de lavado permitiendo una mayor deshidratación (Tapia, et al. 1980). El Cuadro 1, resume el resultado de los análisis físicos - químicos realizados a los granos andinos de quinua y cañihua en cada una de sus variedades estudiadas.

Los valores reportados en el Cuadro 1, para los granos de quinua, son similares a los reportados por Repo-Carrasco (1988), mientras que los valores en los granos de cañihua son similares a los reportados por Kent (1983). Los porcentajes de valores acondicionados de humedad en quinua y cañihua, se aproximan a los valores estimados de 10, 15 y 20 %, dichos porcentajes de humedad fueron considerados porque son los rangos más empleados en los procesos de almacenamiento y transformación como son los procesos de extrusión, expandido y laminado (Mujica, 2000).

Los cálculos de densidad real y aparente, permiten determinar la porosidad del lecho a diferentes niveles de

humedad, esta información permite entender cómo es que los granos se acomodan en el lecho poroso (cedula de difusión térmica) al momento de determinar la difusividad térmica. La porosidad de los granos andinos varía de 0,258 a 0,357 (ver Figura 3), estas variaciones apreciadas se deben a la forma, tamaño y tratamiento térmico efectuado en los granos (Hardmon, 1965).

La Figura 3, muestra que los granos de quinua tienen la mayor porosidad promedio; con respecto a los granos de cañihua, se observa que el grano de quinua variedad INIA – Salcedo tiene la mayor porosidad promedio con 0,357 y el grano de cañihua variedad Ramis tiene el menor promedio de porosidad con 0,258, estas variaciones apreciadas se deben a la forma y tamaño de los granos.

Para la Calibración del equipo y validación de la metodología propuesta para evaluar la difusividad térmica se utilizó el equipo especialmente armado por Ureña (1990), y se trabajó con la metodología propuesta por Poulsen (1982), dicho equipo fue calibrado determinando la difusividad térmica del agua. Los valores experimentales de la difusividad térmica del agua a 20°C (α experimental) fueron comparados con valores de difusividad térmica del agua a 20°C, publicados por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE.UU. (NIST) al que se denominó (α estándar), con la finalidad de obtener el factor de calibración y validación de la metodología.

Cuadro 1: Análisis fisicoquímicos de los granos de quinua y cañihua.

Característica	CAÑIHUA		QUINUA	
	CUPI	RAMIS	B. DE JULY	INIA SALCEDO
Humedad %	8,81	8,57 (10,2*)	9,30	9,18 (11,65**)
Proteína %	13,65	16,27 (14,0*)	16,3	13,487 (13,81**)
Grasa %	3,48	3,3 (4,30*)	8,2	8,18 (5,01**)
Fibra %	3,48	3,36 (4,80*)	4,88	5,11 (4,38**)
ELN %	65,07	60,6 (64,0*)	56,18	61,53 (59,74**)

* Fuente: Repo-Carrasco (1988)

**Fuente: Kent (1983)

Cuadro 2: Valores promedio de la difusividad térmica del agua

Detalle	Promedio
α experimental (m ² /s)	1.5143E-02
α estándar (m ² /s)	1.4367E-02
Factor de corrección (FC)	0.9588

Con el valor experimental encontrado y el dato estándar se determinó el factor de corrección para la calibración del equipo y la validación de la metodología propuesta por Poulsen (1982).

El Cuadro 2, muestra los valores de la difusividad térmica teórica y experimental del agua a 20°C.

En la Figura 4 se presentan los valores de la difusividad térmica calculada a partir de la Ecuación 7

para los granos andinos acondicionados a 10, 15 y 20% de humedad y a 25, 30 y 35 °C. El mayor valor de α corresponde al grano de quinua variedad INIA salcedo con $8.7 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ a 10% de humedad y 35°C, mientras que el menor valor de α es para la cañihua variedad Ramis con $7.5 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ a 10% de humedad y 25°C. La difusividad térmica de los granos andinos disminuye con el incremento del contenido de humedad (Figura 5).

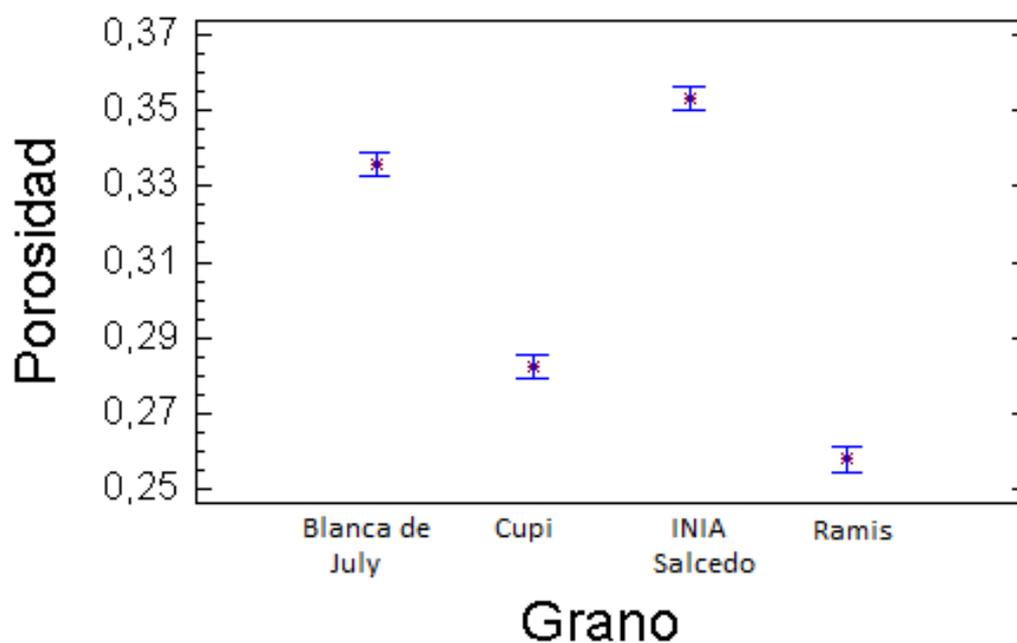


Figura 3. Valores promedio de porosidad en granos andinos

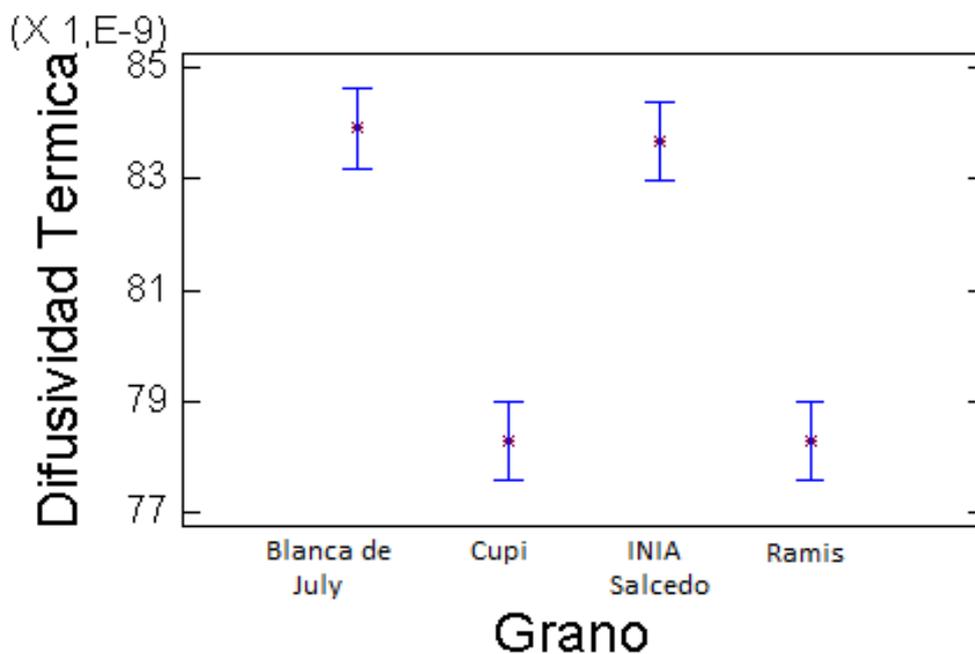


Figura 4. Promedio y desviación estándar de la difusividad térmica en los granos andinos.

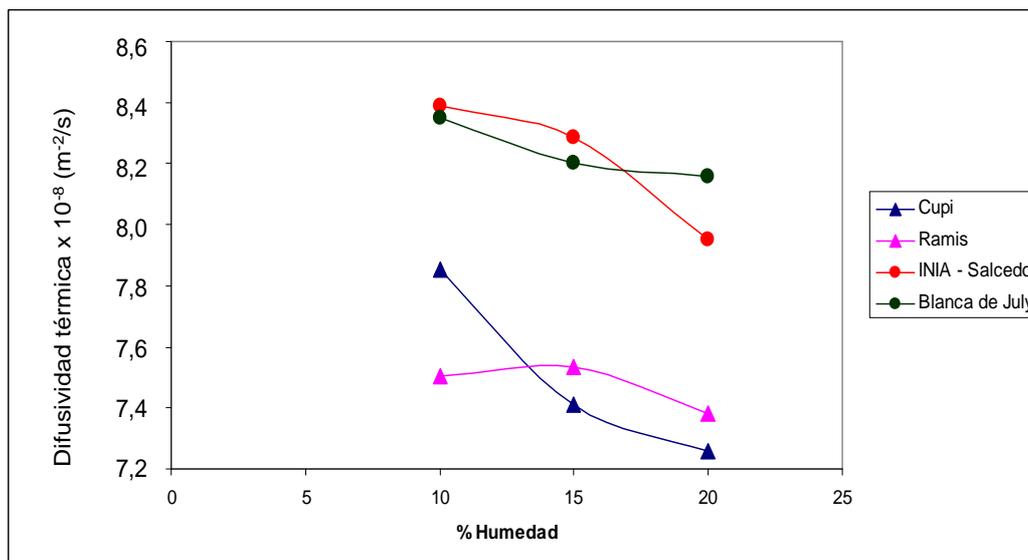


Figura 5. Variación de la difusividad térmica en función a la humedad en granos andinos a 25 + 0,1°C.

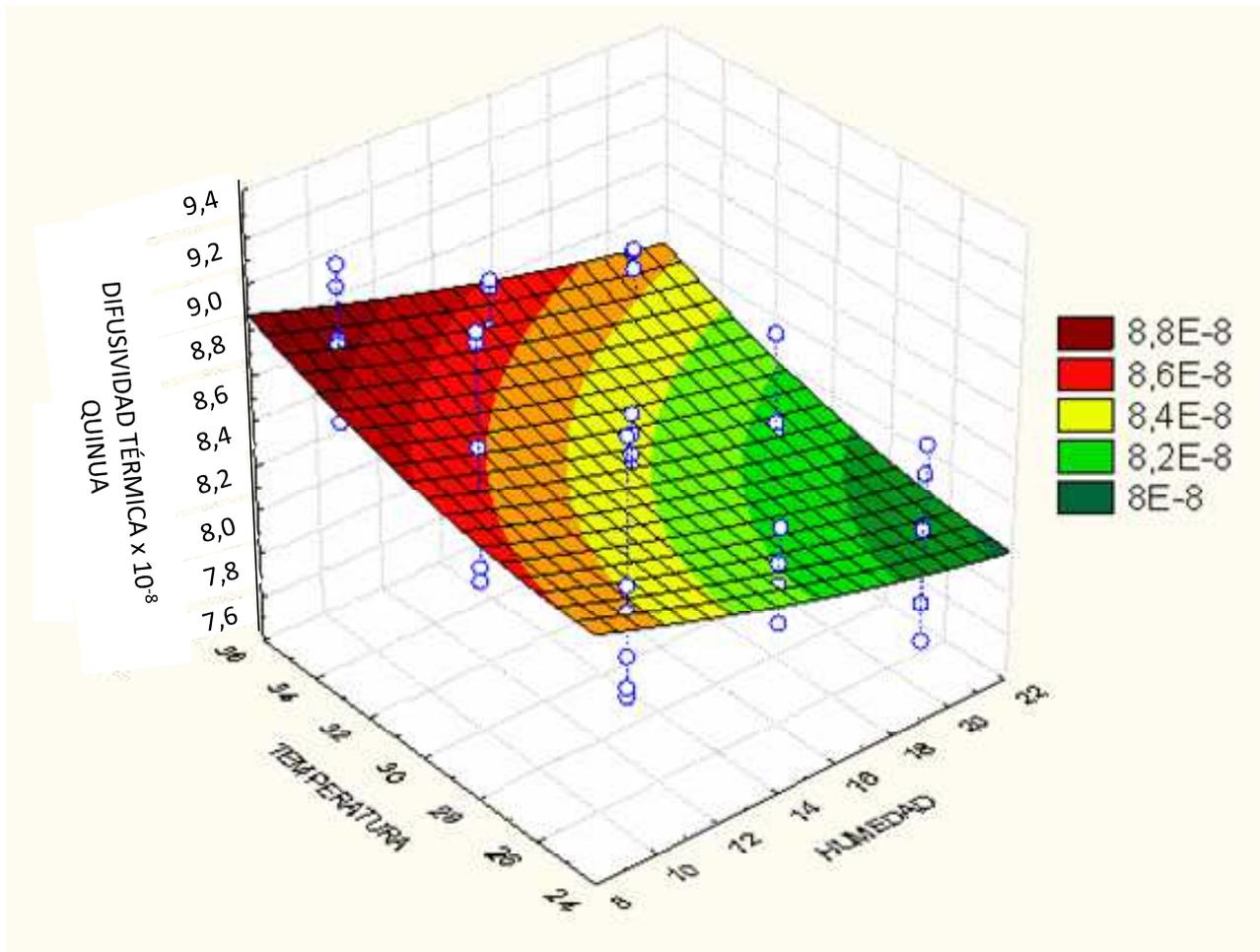


Figura 6a. Superficie de respuesta del efecto de la humedad y la temperatura sobre la difusividad térmica de la quinua, a través del modelamiento cuadrático

$$\alpha_{quinua} = 1.0334 \times 10^{-7} - 7.04 \times 10^{-10} \times H - 1.1635 \times 10^{-9} \times T + 7.854 \times 10^{-12} \times H^2 + 4.2626 \times 10^{-12} \times H \times T + 2.4059 \times 10^{-11} \times T^2 \tag{Ec. 8}$$

Kostaropoulos y Saravacos (1997) e Ibars y Barboza (2003) indican que el contenido de humedad y temperatura influencia en la variabilidad de la difusividad térmica, tal como sucede en el caso de los granos andinos. El comportamiento anómalo de la difusividad térmica en humedades bajas es característico de los alimentos porosos, ya que presentan volúmenes de aire disperso, siendo la difusividad térmica del aire unas 150 veces mayor que la del agua líquida con valores de $2,25 \times 10^{-5}$ m²/s y $1,45 \times 10^{-7}$ m²/s respectivamente a 25 °C. Por lo tanto, los alimentos que tengan una alta porosidad se espera que tengan mayores valores de difusividad térmica (Reidet al., 1987).

Kostaropoulos y Saravacos (1997) afirman la reducción de la difusividad térmica en la región II (humedad 5 – 30%), región del diagrama de cambios generalizados de las propiedades de transporte en función de la humedad. La humedad es adsorbida en capas multimoleculares y los capilares se llenan gradualmente con agua, desplazando el aire, la difusividad térmica es reducida, subsecuentemente la difusividad térmica del agua líquida es más baja que del aire.

Moote (1953) menciona que son escasos los datos en alimentos secos y semi – secos, es decir en humedades inferiores al 30%, ya que esta región es muy importante para modelar el secado y tratamiento térmico de los alimentos, reportando una disminución lineal de la difusividad térmica en granos de trigo, en un rango de humedad de 2 a 15%, así mismo la difusividad térmica aumenta significativamente conforme la porosidad es mayor. Kazarian y Hall (1965) estudiaron la difusividad térmica del trigo blanco y observaron que la difusividad térmica es inversamente proporcional a la humedad y directamente proporcional a la temperatura en rangos de 12,5 a 27 %Hbh, de 10 a 30 °C, y su valor se encuentra entre $8,26 \times 10^{-8}$ a $11,35 \times 10^{-8}$ m²/s.

Los resultados de la difusividad térmica de granos de quinua y cañihua fueron aproximados al modelo matemático (Ecuación 8 y 9) mediante superficie de respuesta (Figura 6 a y b).

Dónde: α = Difusividad térmica (m²s⁻¹), H = Humedad (10 - 20%), T = Temperatura (25-35°C), las Ecuaciones 8 y 9, desarrolladas mediante la función cuadrática (superficie de respuesta de segundo orden), nos permiten realizar interpolaciones en un rango de 25 a 35 °C de temperatura y de 10 a 15% de humedad, se observa (Figura 5 a y b) que conforme incrementa la temperatura de 25 a 35°C el valor de la difusividad térmica es mayor, sin embargo a niveles conforme incrementa la humedad de 10 a 20% su valor se reduce.

El análisis de varianza, reporta que si existe variación estadística significativa entre los tipos de granos. Pero las demás fuentes de variación (Humedad y Temperatura), presentan diferencia significativa, demostrando la dependencia que existe de la difusividad térmica entre la humedad y temperatura. El análisis de la Prueba Tukey, reporta que los promedios de las difusividades térmicas de los granos andinos INIA –Salcedo y Blanca de July (quinua) son diferentes a los granos andinos Cupi y Ramis (cañihua). Por lo tanto se puede generalizar y concluir que la difusividad térmica varía entre los granos de quinua y cañihua en función de su temperatura y humedad.

CONCLUSIONES

Se comprobó que la difusividad térmica de los granos de quinua y cañihua están comprendidas entre 8.797 a 7.9530 x 10⁻⁸ m²/s y 8.20 a 7.2580 x 10⁻⁸ m²/s, con porosidades de 0.35 a 0.33 y 0.28 a 0.25 respectivamente, esta propiedad presenta diferencias entre los granos de quinua y cañihua. Comprobándose la relación directa con la temperatura e inversa con el contenido de humedad en rangos de 20 a 35°C y de 10 a 20% de humedad.

BIBLIOGRAFIA

- ALVARADO, J. Y AGUILERA, J.M. (2001). Métodos para Medir las Propiedades Físicas en la Industria de los Alimentos, Editorial Acribia, S.A.
- BALL, C. O., OLSON, F. W. C. (1957). Sterilization in Food Technology. McGraw Hill, New York, USA.
- CARSLAW, H. S., JAEGER J. C. (1959). Conduction of heat in solids. Oxford University Press, USA.
- DICKERSON, W. R. (1965). An Aparatus for the Measurement of Thermal Diffusivity of foods. *Journal Food Technology*, 18 (5), 198-204.
- GEANKOPLIS, C J. (1995). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 2da. Ed. CECSA. México.
- GUPTA, T.R. (1996). Thermal diffusivity measurements of Wheat flour and Wheat flour Dough. *Journal of food process engineering*, 19, 343-352.
- HARMOND, J. E. (1965): "Physical Properties of Seed", *Transactions of the ASAE*. 8 (1): 30-32.
- HELDMAN C. J. (1983). Factors influencing food freezing rates. *Food Technol.* 37:103-109.
- HERNÁNDEZ, J. E. 1992. Cultivos marginados, otra perspectiva de 1942. Italia, Colección FAO, Boletín N° 26.
- IBARZ, A. Y BARBOSA, G. (2003). Unit operations in food engineering. Inc. Madrid - España.
- KAZARIAN, E.A & HALL, C.W. (1995). Thermal properties of grain. *Trans. ASAE*. 8(1):33-48.
- KENT N. (1983). *Technology of Cereals*. Third edition. Pergamon Press. Oxford, New York.
- KOSTAROPOULOS, A. E.; SARAVACOS, G. D. (1997). Thermal diffusivity of Granular and Porous Foods at Low Moisture Content. *Journal Food Engineering* 33: 101-109.
- LEWIS, M. J. (1993). Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado. Editorial Acribia, Zaragoza España.
- MOHSEININ, N.Ê (1980). *Thermal Properties of Foods and Agricultural. Material-Gordon and Breach Science Publishers*. New York – USA.
- MOHSEININ, N.Ê. (1986). *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach Science Publishers, New York.
- MOOTE, I. (1953). The effect of moisture content on the thermal properties of wheat. *Journal of FoodTechnology*, 3 (1): 57-69.
- MUJICA, A. (2000). Potencial y perspectivas futuras de la quinua (*ChenopodiumquinoaWilld*) en el Perú". *Revista Mosaico*.
- MUJICA, A. (2001). La cañihua (*ChenopodiumpallidicaulleAellen*) en la nutrición humana del Perú.
- POULSEN, K. P. (1982). Thermal Diffusivity of Foods Measured by Simple Equipment. *J. Food Eng.* 1: 115-122.
- REPO-CARRASCO, R. (1998). *Introducción a la Ciencia y Tecnología de cereales y granos andinos*. Lima - Perú.
- REID, R. C., Prausnitz, J. M. y Poling, B. E. (1987). *The Properties of Gases and Liquids*, 4ta Edition. McGraw-Hill, New York.
- SINGH, R. P. (1982). Thermal diffusivity in food processing. *Food Technology*, 36(2), 90.
- TAPIA, M. GANDARILLAS, H., ALANDIA, S., CARDOZO, A. Y MUJICA, A. 1980. Quinua y qañiwa, cultivos andinos. Bogota, Colombia. Insituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 228p
- TAPIA, M.E. 2000. Cultivos andinos sub-explotados y su aporte a la alimentación. Santiago, Chile. 2da. Edición, Of. Regional de la FAO para América Latina y el Caribe
- UREÑA, M. O. 1990. Obtención de Alimentos Modelo a partir de Mezclas de bentonita: Glicerol: Agua para Estudios de Tratamientos Termicos. Valencia, España, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Tecnología de Alimentos, 145p