

## **ALMACENAMIENTO DE GRANOS. MODELIZACIÓN DE LA MIGRACIÓN DE HUMEDAD POR EFECTO DE LA RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE**

**A. Gastón, R. Abalone, A. Cassinera, M. A. Lara**  
Consejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario  
Fac. de Cs. Exs., Ing. y Agrimensura. U. N. Rosario  
Instituto de Física Rosario (FCA-CONICET-U. N. Rosario)  
Fac. de Ciencias Agrarias. U. N. Rosario  
Tel: 0341-4495467 int. 33 e-mail: [analiag@fceia.unr.edu.ar](mailto:analiag@fceia.unr.edu.ar)

**RESUMEN:** En el presente trabajo se comparan dos modelos bidimensionales para predecir la evolución de la distribución de temperatura y la migración de humedad por efecto de las variaciones climáticas estacionales, de granos de soja almacenados en silos convencionales. El modelo M1 considera simetría axial y calcula distribuciones empleando valores promedios de radiación solar incidente sobre la pared vertical. El modelo M2 calcula esta distribución en el plano horizontal de la zona media del silo considerando la radiación solar incidente en cada dirección: N, S, E, O. En la pared lateral del silo, la diferencia de temperaturas entre la dirección Norte y la predicha por M1 es aproximadamente +6C en invierno y -1C en verano. En la dirección Sur esta diferencia es del orden de -3C durante todo el período analizado. La migración de humedad hacia los bordes debido a los gradientes térmicos crea zonas de potencial deterioro.

**Palabras clave:** Almacenamiento de soja, Transferencia de calor y materia, Radiación solar, Simulación numérica.

### **INTRODUCCION**

La temperatura y la humedad son los dos factores más importantes que afectan la calidad de los granos durante el período de almacenamiento. La temperatura del grano ensilado puede ser modificada tanto por fuentes internas como externas de calor alterando localmente las condiciones de equilibrio del grano con su medio ambiente. Las fuentes internas están asociadas a la respiración propia del grano, a la proliferación de insectos y hongos, siendo estas fuentes dependientes de la temperatura del grano, de su contenido de humedad y de la humedad relativa del aire intergranario. Las fuentes externas dependen principalmente de la variación de las condiciones climáticas estacionales durante el tiempo de almacenamiento: temperatura y humedad relativa ambiente, velocidad del viento y radiación solar incidente. La radiación solar incidente depende fuertemente de la orientación de la superficie captora durante el año.

Gradientes de temperatura dentro de la masa de granos producen la migración de la humedad desde las zonas calientes a las frías pudiendo generarse zonas con condiciones propicias para su deterioro.

El recurso empleado para reducir los riesgos de deterioro es enfriar los granos por medio de sistemas de aireación. Las estrategias de aireación son fuertemente dependientes de las condiciones climáticas. La predicción del riesgo potencial de deterioro así como la estimación más precisa de variables empleadas para su control (temperatura promedio del granel comparada con la temperatura y humedad relativa ambiente) pueden contribuir a mejorar su diseño y planificación en períodos prolongados de almacenamiento.

La modelización numérica resulta ser una herramienta de gran utilidad para predecir el deterioro potencial en comparación con un costoso monitoreo permanente de la temperatura y de la humedad de los granos almacenados. La predicción de la distribución de temperatura y humedad involucra la resolución acoplada de las ecuaciones de conservación de masa, de momento y de energía con diversos grados de complejidad según las hipótesis consideradas.

## MODELO MATEMATICO

Se introdujeron las siguientes hipótesis en la modelización de la distribución de temperatura y de contenido de humedad del lecho de granos dentro del silo:

1. en cada punto del lecho el aire intergranario se encuentra en equilibrio térmico y sorpcional con la masa de granos
2. se considera el lecho de granos ensilados como un continuo, con la fases aire y grano distribuidas uniformemente
3. no se considera la respiración de los granos
4. no se incluye la transferencia de energía y masa por convección
5. se desprecia el cambio de volumen del lecho por encogimiento, manteniéndose constante la porosidad

Planteando el balance de energía y de agua para los granos y el aire intergranario, en un volumen de control, se obtiene el siguiente sistema acoplado de un componente (Abalone et al., 2006; Khankari et al., 1994; Montross et al., 2002):

$$c_b \rho_b \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_b \nabla T) + \rho_b L_g \frac{\partial W_g}{\partial t} \quad (1)$$

$$\rho_b \frac{\partial W_g}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \eta \nabla W_g) + \nabla \cdot (D_{ef} \omega \nabla T_k) \quad (2)$$

donde  $D_{ef} = \frac{D_v \varepsilon}{R_v \tau T_k}$  es la difusividad efectiva del vapor de agua a través del lecho de granos (Keey, 1975). Las funciones  $\eta$  y  $\omega$  se definen a través de la curva de sorpción-desorpción,  $p_v = f(W_g, T)$ :

$$\eta = \left. \frac{\partial f(W_g, T)}{\partial W_g} \right|_T \quad \omega = \left. \frac{\partial f(W_g, T)}{\partial T} \right|_{W_g} \quad (3)$$

### Modelo M1

El modelo M1 calcula la distribución promedio de la temperatura y contenido de humedad del grano considerando simetría axial y valores promedio de radiación solar incidente sobre la pared vertical.

La Figura 1 muestra el dominio de cálculo. Las condiciones iniciales y de contorno son:

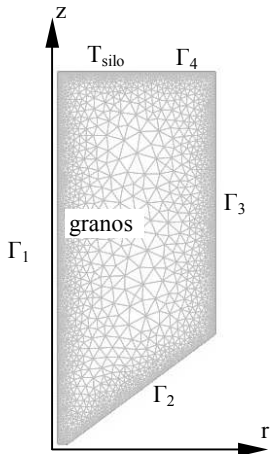


Figura 1: Dominio de calculo M1

$$T_g(r, z, t=0) = T_g(r, z) \quad W_g(r, z, t=0) = W_0(r, z) \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad \text{en } \Gamma_1 \quad (5)$$

$$-k_b \frac{\partial T}{\partial n} = h_{c2}(T - T_{amb}) \quad \text{en } \Gamma_2 \quad (6)$$

$$-k_b \frac{\partial T}{\partial n} = h_{c3}(T - T_{amb}) + \alpha G_3 - \xi \sigma (T^4 - T_{cielo}^4) \quad \text{en } \Gamma_3 \quad (7)$$

$$-k_b \frac{\partial T}{\partial n} = h_{c4}(T - T_{silo}) \quad \text{en } \Gamma_4$$

(8)

$$\frac{\partial p_v}{\partial n} = 0 \Rightarrow \eta D_{ef} \frac{\partial W_g}{\partial n} = -\omega D_{ef} \frac{\partial T}{\partial n} \quad \text{en } \Gamma \quad (9)$$

Esta última condición implica que el silo es hermético a la transferencia de masa y que la redistribución de la humedad en el lecho se debe a los gradientes de temperatura.

### Modelo M2

El modelo M2 determina la temperatura y el contenido de humedad del grano en un plano horizontal en la zona media del silo. La superficie lateral del silo se dividió en 32 planos de incidencia  $\Gamma_i$  (Jiang, 1987) y se consideró la radiación solar incidente sobre cada uno:

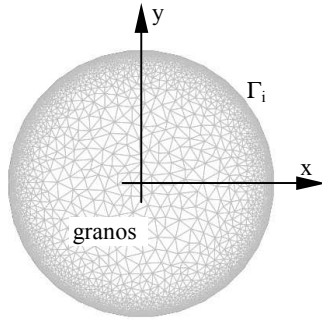


Figura 2: Dominio de calculo M2

Las condiciones iniciales y de contorno para el dominio de la Figura 2 son:

$$T_g(r, z, t=0) = T_g(r, z) \quad W_g(r, z, t=0) = W_0(r, z) \quad (10)$$

$$-k_b \frac{\partial T}{\partial n_i} = h_{c3}(T_i - T_{amb}) + \alpha G_i - \varepsilon \sigma (T_i^4 - T_{cielo}^4) \quad \text{sobre la cara } i\text{-ésima} \quad (11)$$

$$\frac{\partial p_v}{\partial n} = 0 \Rightarrow \eta D_{ef} \frac{\partial W_g}{\partial n} = -\omega D_{ef} \frac{\partial T}{\partial n} \quad \text{en } \Gamma \quad (12)$$

### Solución Numérica

La resolución numérica de los sistemas acoplados formados por las ecuaciones (1) y (2) con las condiciones iniciales y de contorno correspondientes a cada modelo se efectuó por el método de los elementos finitos, utilizando un software de uso profesional (COMSOL Multiphysics). La discretización del dominio se realizó con una densificación de la malla sobre la frontera, donde se concentran los mayores gradientes de temperatura y humedad, como se muestra en las Figuras 1 y 2. Se emplearon elementos Lagrangianos de orden dos, e integración numérica de cuarto orden.

### RESULTADOS OBTENIDOS

Empleando los modelos presentados se analizó la evolución de la temperatura y la migración de la humedad de granos de soja almacenados a 20C y 13.0% b.h. (14.9% b.s.) durante 200 días a partir del 15 de Mayo. El silo simulado corresponde a un silo metálico de acero galvanizado de 6 m de diámetro y 8.5 m de altura, con un nivel de granos de 7.1 m.

La temperatura inicial de almacenamiento de la soja (20C) corresponde al límite inferior de temperatura necesaria para el desarrollo de hongos e insectos. La humedad inicial corresponde al valor de almacenamiento seguro para la cual la respiración del grano así como la pérdida de materia seca pueden despreciables lo que justifica la hipótesis considerada.

Respecto de las condiciones climáticas, se emplearon valores diarios de temperatura y humedad relativa ambiente y de velocidad del viento, obtenidos a partir de promedios estadísticos mensuales del período 1981-1990 en la ciudad de Rosario. La radiación solar global incidente sobre una superficie horizontal  $G_0$  fue calculada en base al modelo C (Iqbal, 1983) de transferencia radiativa de la atmósfera, utilizando parámetros atmosféricos estándares para la zona.

Para el M2, se estimó el promedio diario de la radiación incidente  $G_i$  sobre cada plano de incidencia  $\Gamma_i$  a partir de la radiación sobre el plano horizontal  $G_0$ . Para el M1, la radiación incidente promedio sobre toda la pared lateral  $G$  se calculó como el promedio de las  $G_i$ . La Figura 3 compara los valores de radiación solar incidente promedio sobre la pared lateral del silo y la radiación incidente en cuatro planos de incidencia principales: Norte – Sur – Este – Oeste, para el período en estudio.

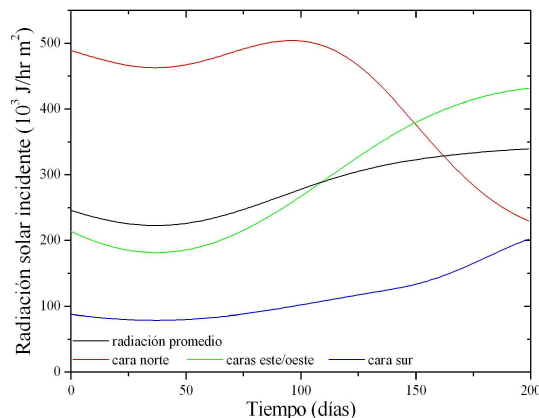


Figura 3: Comparación de la radiación promedio solar incidente sobre la pared lateral y sobre los planos de incidencia Norte, Sur y Este-Oeste durante el periodo de almacenamiento.

En la Tabla 1 se presentan expresiones y valores de los parámetros térmicos usados. Como el espesor de la carcasa del silo es de aproximadamente 2 mm, en la modelización ésta se incluyó como una conductancia en serie con las conductancias por

convección listadas. En la Tabla 2 se muestran las propiedades de los granos y lecho de soja y en la Tabla 3, las propiedades del vapor de agua. La relación de equilibrio sorpcional para la soja se expresó por medio de la ecuación de Henderson-Thompson (Brokker et al., 1992)

Coef. de trans. de calor [W/m <sup>2</sup> C]	$h_{c3} = 8.6 \frac{V^{0.6}}{L^{0.4}} \quad h_{c2} = 0.5h_{c3} \quad h_{c4} = 1$
Temperatura del aire en el cono superior del silo [C]	$T_{silo}(t) = T_{amb}(t) + 5$
Temperatura de cielo [K]	$\sigma T_c^4 = \xi_c \sigma T_{amb}^4$
Emisividad del cielo	$\xi_c = 0.82$
Emisividad del acero	$\xi = 0.28$
Absortividad del acero	$\alpha = 0.89$

Tabla 1: Parámetros del modelo térmico (Alagusundaram et al., 1990; Duffie and Beckman, 1980; Mills, 1995)

Densidad del lecho de soja [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_b = 734.5 - 219M + M^2$
Porosidad del lecho	$\epsilon = 0.338$
Cond. térmica del grano de soja [W/mC]	$k_g = 0.21$
Calor esp. de grano de soja [J/kg C]	$c_g = 1699 + 0.017M$
Ecuación de Henderson-Thompson [Pa]	$K_H = 30.5327 \cdot 10^{-5} ; C_H = 134.136; N = 1.2164$
Tortuosidad	$\tau = 1.53$

Tabla 2: Propiedades de los granos y lecho de soja (ASAE, 2003a, 2003b; Broker et al., 1992)

Difusividad del vapor de agua [m <sup>2</sup> /s]	$D_v = \frac{9.110^{-9}(T_k)^{2.5}}{(T_k + 245.18)}$
Presión de saturación del vapor [Pa]	$p_s = \exp\left\{54.12 - \frac{6547.1}{T_k} - 4.230 \ln T_k\right\}$

Tabla 3: Propiedades del vapor de agua (Giner et al., 1996; Thorpe, 1980)

En la Figura 4 se muestra la evolución de la temperatura para distintas posiciones radiales calculadas con el modelo M1, en comparación a la temperatura calculada con el modelo M2 en las direcciones Este y Oeste. Puede verse que el comportamiento es similar con una diferencia máxima de 2C.

Los resultados numéricos muestran que la temperatura varía rápidamente en una capa cercana a la pared lateral del silo. La temperatura sobre la pared lateral ( $r = 3m$ ) sigue las fluctuaciones de la temperatura ambiente con valores aproximadamente 3C mayores durante todo el período de almacenamiento, debido a la radiación solar incidente.

Como consecuencia de la baja conductividad de los granos, la amplitud de la oscilación de la temperatura disminuye hacia el interior del silo, aumentando el tiempo de retardo entre los valores pico de temperatura ambiente y de los granos. La zona central del silo registra una disminución de aproximadamente 3C al cabo de 150 días, por lo tanto la disminución de la temperatura ambiente durante el período invernal no alcanza a propagarse hacia la zona central logrando que el grano alcance temperaturas más bajas y más seguras para el almacenamiento. Asimismo, al cabo de 120 días la temperatura supera ampliamente los 20C en la zona cercana a la pared lateral del silo, haciéndose necesaria la aireación del mismo para controlar la posible proliferación de insectos.

La Figura 5 muestra la distribución del contenido de humedad de los granos en dirección radial, para diversos tiempos durante el período de almacenamiento. Los gradientes térmicos producen la migración de humedad hacia la pared lateral, generando una capa de aproximadamente 10 cm de espesor de grano con 0.4% de humedad sobre la humedad de almacenamiento seguro.

La Figura 6 presenta las temperaturas calculadas con el modelo M2 en las direcciones Norte y Sur, mostrando un comportamiento claramente diferente. La temperatura sobre la cara lateral en la dirección Sur sigue prácticamente la temperatura ambiente debido a la escasa radiación solar incidente mientras que en la dirección Norte, la temperatura se mantiene por encima de los 20C durante casi todo el período de almacenamiento. Estos gradientes de temperatura producen migración de humedad diferente en ambas direcciones como puede verse en la Figura 7.

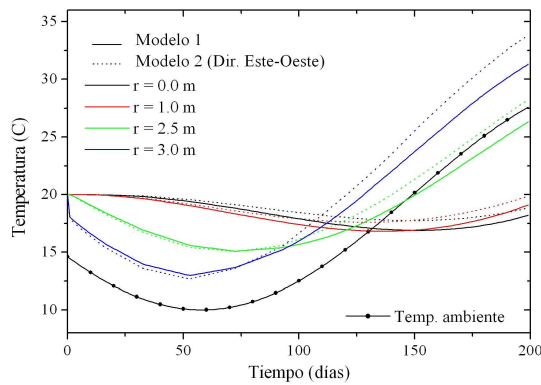


Figura 4: Comparación entre las temperaturas calculadas con el M1 y el M2 en la dirección Este-Oeste.

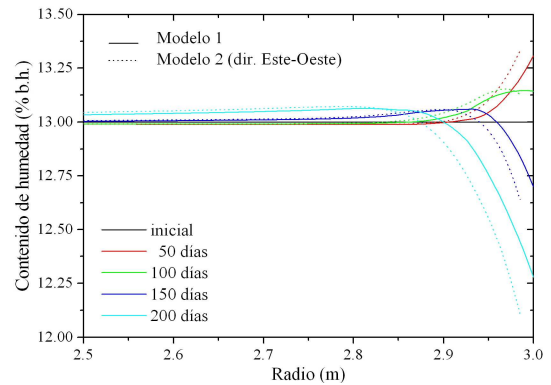


Figura 5: Comparación entre los contenidos de humedad calculados con el M1 y el M2 en la dirección Este-Oeste.

En la superficie, la diferencia de temperaturas entre la dirección Norte y la temperatura predicha por M1 es aproximadamente +6C durante el invierno y -1C durante el verano. La diferencia de temperaturas entre la dirección Sur y la temperatura predicha por M1 es del orden de -3C durante el período analizado (Figura 8).

La Figura 9 muestra las correspondientes diferencias para el contenido de humedad con valores máximos de -0.3 en dirección Norte.

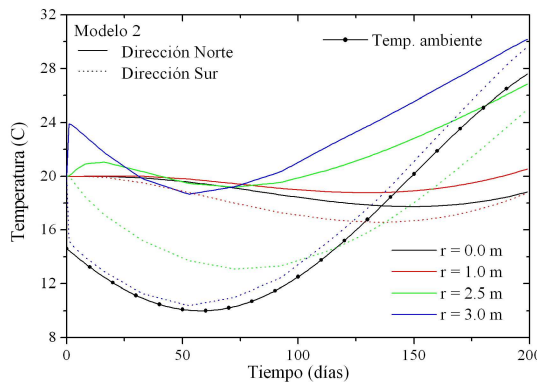


Figura 6: Comparación de temperaturas calculadas con el M2 en las direcciones Norte y Sur.

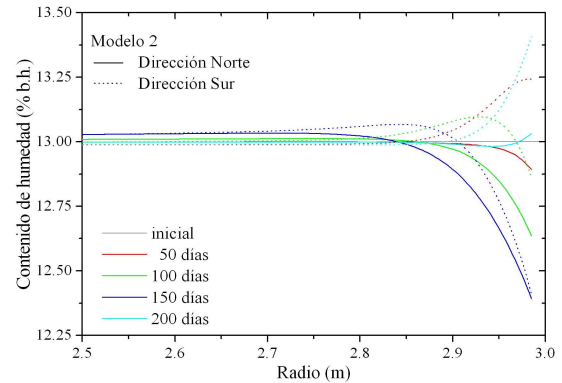


Figura 7: Comparación del contenido de humedad calculados con el M2 en las direcciones Norte y Sur.

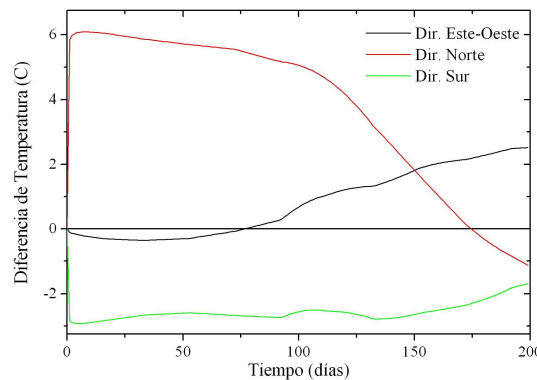


Figura 8: Diferencia de temperaturas calculadas con ambos modelos en  $r = 3m$  para las direcciones N, S y E-O.

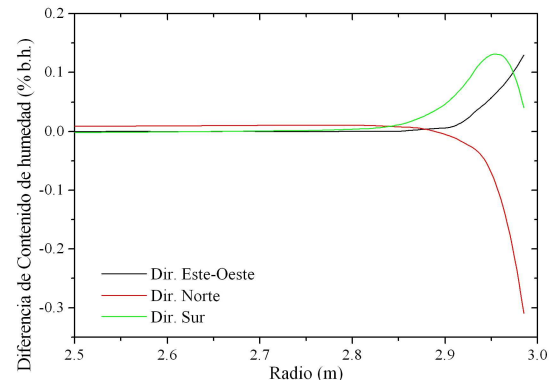


Figura 9: Diferencia de contenido de humedad calculadas con ambos modelos para las direcciones N, S y E-O para 50 días.

Finalmente, a partir de la relación de Henderson Thompson puede determinarse la humedad relativa del aire en equilibrio sorpcional con el grano, en cada punto del silo, empleando los valores predichos de la temperatura y el contenido de humedad del grano. En este caso, las condiciones de almacenamiento corresponden a un 70% de humedad relativa, límite inferior para la proliferación de hongos en el granel. Durante el almacenamiento, la migración de humedad hacia los bordes provoca un aumento de este valor hasta un 75% creando una zona de potencial deterioro.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se describen dos modelos bidimensionales de transferencia de calor y masa en granos almacenados, para predecir la evolución de la distribución de temperatura y la migración de la humedad por efecto de las variaciones de las condiciones climáticas estacionales.

Estos modelos tienen como principal hipótesis el equilibrio sorpcional entre la masa de granos y el aire intergranario y fueron resueltos mediante el método de elementos finitos. Se analizó el almacenamiento de soja a 20 C y 13.0% b.h. (14.9% b.s.) durante 200 días desde el 15 de Mayo.

Los resultados muestran que la temperatura de los granos de la capa cercana a la pared metálica siguen las fluctuaciones de la temperatura ambiente con cierto retardo. Hacia el interior del silo los cambios de temperatura decrecen rápidamente y aumenta el tiempo de retardo. La zona central resulta ser la menos sensitiva, por lo tanto si la temperatura inicial de los granos es alta, difícilmente pueda disminuir por efecto de los cambios ambientales.

A la altura media del silo, las temperaturas calculadas con M1 siguen la misma evolución que las caras Este y Oeste del M2. En la superficie, la diferencia de temperaturas entre la cara Norte y la temperatura predicha por M1 es aproximadamente +6 C durante el invierno y -1 C durante el verano. La diferencia de temperaturas entre la cara Sur y la temperatura predicha por M1 es del orden de -3 C durante el período analizado.

Las condiciones de almacenamiento corresponden al 70% de humedad relativa del aire intergranario, límite inferior para la proliferación de hongos en el granel. Durante el almacenamiento, la migración de humedad hacia los bordes (del orden de 0.4% b.h.) provoca un aumento de este valor hasta un 75% creando una zona de potencial deterioro.

Para mejorar el modelo de transferencia y masa, debe incorporarse el efecto de las corrientes de convección natural que generan los gradientes de temperatura así como la influencia de la masa de aire sobre la superficie de los granos y el techo del silo. Así mismo se incorporará el efecto de la respiración de los granos y la evaluación de la pérdida de materia seca para completar el modelo y poder evaluar el deterioro de los granos especialmente en los casos de almacenamiento fuera de las condiciones de seguridad.

## NOMENCLATURA

$c_b$	calor específico del lecho de granos (J/kg K)
$C_H, K_H, N$	constantes de la ecuación de Henderson Thompson
$D_v$	difusividad del vapor de agua en el aire ( $m^2/s$ )
$D_{ef}$	difusividad efectiva del vapor de agua en el lecho ( $m^2/s$ )
$f(W_g, T)$	curva de sorpción-desorción
$G_0, G_i$	radiación solar incidente sobre la superficie horizontal y superficie $\Gamma_i$ ( $W/m^2$ )
$k_b$	conductividad térmica del lecho de granos ( $W/mK$ )
$L$	longitud característica (m)
$L_g$	calor de desorción del agua en el grano (calor de vaporización) (J/kg)
$M$	contenido de humedad del grano (base húmeda, kg / kg grano húmedo)
$Nu$	número de Nusselt, ( $f$ : convección forzada; $n$ : convección natural)
$n$	dirección normal a la frontera
$p_s$	presión de saturación del vapor de agua (Pa)
$p_v$	presión de vapor de agua en el aire intergranario (Pa)
$R_v$	constante de vapor de agua, (461.52 J/kgC)
$t$	tiempo (s)
$T, T_k$	temperatura (C), (K)
$T_{amb}$	temperatura ambiente (C)
$T_{cielo}$	temperatura de cielo (C)
$T_{silo}$	temperatura del aire en el cono superior del silo (C)
$T_0$	temperatura inicial de los granos (C)
$V$	velocidad del viento (m/s)
$W_g$	contenido de humedad del grano (base seca, kg / kg grano seco)
$W_0$	contenido de humedad inicial de los grano (base seca, kg / kg grano seco)
$h_c$	coeficiente de transferencia de calor por convección ( $W/m^2 C$ )
$\alpha$	absortividad
$\epsilon$	porosidad ( $m^3$ de aire/ $m^3$ de lecho)
$\xi$	emisividad
$\tau$	tortuosidad del lecho de granos
$\sigma$	constante de Stefan-Boltzmann, $5.6697 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$
$\eta$	cambio de $p_v$ respecto al contenido de humedad, a temperatura constante, (Pa)
$\omega$	cambio de $p_v$ respecto a la temperatura, a contenido de humedad constante, (Pa/K)
$\Gamma$	frontera del dominio
$\rho_b$	densidad del lecho de granos ( $kg/m^3$ )

## REFERENCIAS

- Abalone R. M., Gastón A., Cassinera A. y Lara M. A. (2006). Modelización de la distribución de la temperatura y humedad en granos almacenados en silos. *Mecánica Computacional* Vol. XXV, 233-247.
- ASAE Standards D241.4. (2003a). Density, Specific Gravity, and Mass-Moisture Relationships of Grain for Storage American Society of Agriculture Engineers, St Joseph, MI, USA,
- ASAE Standards D243.4. (2003b). Thermal Properties of Grain and Grain Products. American Society of Agriculture Engineers, St Joseph, MI, USA,
- Alagusundaram K., Jayas D. S., White N. D. G. y Muir W. E. (1990). Three dimensional, finite element, heat transfer model of temperature distribution in grain storage bins. *Trans. of ASAE*, 33(2): 577-584.
- Brooker D., Bakker-Arkema F. W. y Hall C. W.. (1992). *The Drying and Storage of Grains and Oilseeds*. Van Nostrand Reinhold, Avi Book, New York,
- Duffie J. y Beckman W.. (1980). *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons.
- Giner S. A.; Mascheroni R. H.; Nellist M. N. (1996). Cross flow drying of wheat. A simulation program with a diffusion-based deep-bed model and kinetic equation for viability loss estimations. *Drying Technology*, 14(7&8): 1625-1670.
- Iqbal M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Academic Press.
- Jiang S., Jayas D. S., White N. D. G. y Alagusundaram K. (2005). A three-dimensional, asymmetric, and transient model to predict grain temperatures in grain storage bins. *Trans. of ASAE*, 48(1): 263-271.
- Keye R. B.. (1975). *Drying Principles and Practice*. Pergamon Press, Oxford.
- Mills A. F. (1995). *Transferencia de Calor*. Editorial Irwin.
- Montross D. M., Maier D. E. y Haghighi K. (2002). Development of a finite-element stored grain ecosystem model. *Trans. of ASAE*, 45(5): 1455-1464.
- Thorpe G. R.. (1980). Moisture diffusion through bulk grain. *J. Stored Products. Res.*, 18: 9-12.

## ABSTRACT

In present work two bidimensional models that predict the time temperature evolution and moisture migration by effect of the seasonal climatic variations, of grains stored in a conventional bin are compared.

Model M1 is axisymmetric and calculates a mean temperature and moisture content distribution applying mean values of the incident solar radiation on the vertical wall. Model M2 evaluates these distributions in the middle horizontal plane of the structure taking into account the solar radiation incident on the North, South, East and West side of the bin. The coupled energy and mass balances equations were solved by use of the finite element method.

In the sidewall of the silo, the temperature difference between the North direction and the predicted one by M1 are approximately +6C in winter and - 1C in summer. In the South direction this difference is of the order of -3C throughout the analyzed period. The humidity migration towards the edges due to the thermal gradients creates zones of potential spoilage.

**Keywords:** soybean storage, heat and mass transfer, solar radiation, numerical simulation