



ALMACENAMIENTO DE GRANOS EN SILOS CONVENCIONALES. TRANSFERENCIA DE ENERGÍA, MASA y MOMENTO

Ulises Balzi¹, Analía Gastón^{1,2}, Rita Abalone^{1,3}

¹Fac. de Cs. Exs., Ing. y Agrimensura. U. N. Rosario

²Consejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario

³Instituto de Física Rosario (UNR - CONICET)

Tel: 0341-4495467 int. 33, e-mail: analiag@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN: En el presente trabajo se describe un modelo 2D para predecir las corrientes de convección natural, la evolución de la temperatura y la migración de humedad en trigo almacenado a 13% b.h. y 30°C en un silo convencional durante el período verano-invierno para las condiciones climáticas de Rosario. Se analizó el efecto del diámetro del silo y de la permeabilidad del grano en el desarrollo de las corrientes de convección. Esto permitió predecir las condiciones de almacenabilidad durante el período considerado. En todos los casos, el enfriamiento natural es insuficiente para llevar al grano por debajo de los 18°C siendo necesario recurrir a la aireación. La migración de humedad no provoca una redistribución de la humedad que comprometa el límite de seguridad (Humedad Relativa de Equilibrio (HRE) > 75%). Un aumento en un factor 10 en la permeabilidad puede producir una acumulación de humedad en la zona superior del silo, creando zonas propicias para el desarrollo de hongos.

Palabras clave: Almacenamiento de granos, Transferencia de energía, masa y momento, Simulación numérica.

INTRODUCCION

La metodología empleada para reducir los riesgos de deterioro de los granos almacenados en silos convencionales es enfriarlos por medio de sistemas de aireación. El conocimiento preciso de cómo evoluciona la distribución de temperatura y humedad durante largos períodos es fundamental para el diseño y mejoramiento de estos sistemas. La pérdida de materia seca ligada a los procesos respiratorios, el desarrollo de insectos, hongos y micotoxinas son factores muy importantes que afectan la calidad de los granos y dependen fuertemente de la temperatura y la humedad de los mismos durante el almacenamiento.

La modelización numérica resulta ser una herramienta de gran utilidad para predecir el deterioro potencial y las condiciones de almacenabilidad basadas en las características climáticas de cada zona agrícola en particular. El costo de ensayos de campo con una gran variedad condiciones resultan económicamente inviables. Una revisión de los modelos publicados para analizar la transferencia de energía, masa y momento en sistemas de almacenamiento de granos puede consultarse en Navarro y Noyes (2002).

Son escasas las referencias bibliográficas sobre la modelización del almacenamiento de granos para las condiciones climáticas características del hemisferio sur (Andrade et al., 2002; Sinicio y Muir, 1998; 1996) y no existen para la zona agrícola argentina. Dada la relevancia económica que tiene la producción de granos en Argentina es importante implementar los modelos de simulación mencionados que contribuyan a definir estrategias de almacenaje seguro en silos convencionales y silos-bolsa basadas en el análisis de los procesos de transferencia de energía, masa y momento.

Con este objetivo, se avanzó en la modelización incorporando los efectos de la convección natural y la respiración de los granos al modelo previamente desarrollado (Abalone et al., 2006) para predecir los patrones de flujo, distribución de la temperatura y de humedad del grano ensilado durante los períodos sin aireación.

El modelo fue resuelto por el método de elementos finitos y aplicado para evaluar la evolución de la temperatura y la migración de humedad de trigo ensilado durante el período verano-invierno (de Enero a Julio) para las condiciones climáticas de la zona de Rosario. Se analizó el efecto del tamaño del silo y la permeabilidad del grano en la convección natural dentro del silo.

MODELO MATEMATICO

Se considera al granel como un medio poroso isotrópico saturado con un fluido newtoniano con propiedades de transporte efectivas, resultado del promedio ponderado de las propiedades termodinámicas del sólido y del fluido (Slattery, 1972). Los granos presentan valores de permeabilidad K del orden de 10^{-8} m^2 (Singh et al., 1993) siendo el número de Darcy Da del orden de 10^{-9} y el rango del número de Rayleigh $Ra \approx 10-100$. En consecuencia, los efectos inerciales y viscosos son pequeños en

comparación con los efectos de presión y fuerzas de flotación en la ecuación de momento (Nield y Bejan, 1999), por lo que el flujo se modela con la ecuación de Darcy. Se emplea además la aproximación de Boussinesq, que considera a la densidad constante, excepto en el término de fuerzas volumétricas.

Por otro lado se asumió que en cada punto del lecho el aire intersticial se encuentra en equilibrio térmico y sorpcional con la masa de granos y que el cambio de volumen del lecho por encogimiento es despreciable, manteniéndose constante la porosidad.

Planteando los balances de energía masa y momento y empleando la definición de la función de corriente se obtiene el siguiente sistema acoplado (Balzi et al., 2008; Khankari et al., 1994; Montross et al., 2002):

$$v_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial z}; \quad v_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = -\frac{K}{\mu} g \rho_0 \beta \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2)$$

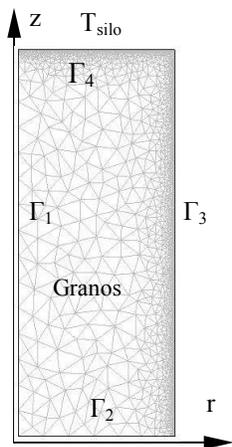
$$\rho_b c_b \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_a c_a \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_b \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r k_b \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} + \rho_b L_g \frac{\partial W_g}{\partial t} + \rho_{bs} q_H \frac{d Y_{CO_2}}{dt} \quad (3)$$

$$\rho_b \frac{\partial W_g}{\partial t} + \frac{\eta \cdot}{R_v \cdot T_k} \left[\left(v_r \frac{\partial W_g}{\partial r} \right) + \left(v_z \frac{\partial W_g}{\partial z} \right) \right] = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_M \frac{\partial W_g}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r D_M \frac{\partial W_g}{\partial z} \right) \right\} + \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_T \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r D_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} - \frac{\omega}{R_v T_k} \left[\left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \left(v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \rho_{bs} q_w \frac{d Y_{CO_2}}{dt} \quad (4)$$

$$\eta = \left. \frac{\partial f(W_g, T)}{\partial W_g} \right|_T \quad \omega = \left. \frac{\partial f(W_g, T)}{\partial T} \right|_{W_g} \quad (5)$$

donde D_{ef} es la difusividad efectiva del vapor de agua a través del lecho de granos (Singh et al., 1993) y las funciones η y ω se definen a través de la curva de sorpción-desorpción, $p_v = f(W_g, T)$. La ecuación (3) representa el balance de energía en la cual los últimos términos dan cuenta de la energía necesaria para evaporar el agua en la masa de granos y el calor generado en los procesos metabólicos de respiración. La ecuación (4) representa el balance de contenido de humedad. La masa de granos actúa como una fuente o sumidero de vapor de agua que es transportado por conducción y convección a través del espacio intersticial. Esta fuente/sumidero está vinculada con la condición de equilibrio sorpcional entre el grano y el aire. Una deducción detallada de las ecuaciones de balance fue presentado en Abalone et al. (2006). El último término en esta ecuación representa el aporte de humedad generada en los procesos metabólicos de respiración.

La Figura 1 muestra el dominio de cálculo, las condiciones iniciales y de contorno. Las ecuaciones (7) y (11) implican que el silo es hermético a la transferencia de masa.



$$T_g(r, z, t=0) = T_g(r, z) \quad ; \quad W_g(r, z, t=0) = W_0(r, z) \quad (6)$$

$$\Psi(r, z, t=0) = 0 \quad \text{en } \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4 \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad \text{en } \Gamma_1 + \Gamma_2 \quad (8)$$

$$-k_b \frac{\partial T}{\partial n} = h_{c3} (T - T_{amb}) - \alpha G_3 + \xi \sigma (T^4 - T_{cielo}^4) \quad \text{en } \Gamma_3 \quad (9)$$

$$-k_b \frac{\partial T}{\partial n} = h_{c4} (T - T_{silo}) \quad \text{en } \Gamma_4 \quad (10)$$

$$\frac{\partial p_v}{\partial n} = 0 \quad \Rightarrow \quad \eta D_{ef} \frac{\partial W_g}{\partial n} = -\omega D_{ef} \frac{\partial T}{\partial n} \quad \text{en } \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4 \quad (11)$$

Figura 1: Dominio de cálculo. Condiciones iniciales y condiciones de contorno

Solución Numérica

La resolución numérica de los sistemas acoplados formados por las ecuaciones (2), (3) y (4) con las correspondientes condiciones iniciales y de contorno se efectuó por el método de los elementos finitos utilizando COMSOL Multiphysics 3.4. 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 la Figura 1. Se emplearon elementos Lagrangianos de orden dos, e integración numérica de cuarto orden.

RESULTADOS OBTENIDOS

Se utilizó el modelo para analizar la variación de la temperatura y la migración de la humedad ocasionadas por los cambios climáticos en trigo almacenado durante 210 días desde el 1 de Enero con las siguientes condiciones: humedad inicial 13.5% b.h. (base húmeda; 15.6% b.s., base seca) y temperatura de almacenamiento 30°C.

Se consideraron silos de diámetro D 10.8 m (S1), 13.6 m (S2) y 18 m (S3) con una altura H de grano de 13 m (razón de aspecto $H/D \sim 1.23, 0.96, 0.72$). Estas dimensiones son representativas de silos que se emplean en acopios de granos en la zona agrícola de Rosario.

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.

En la Tabla 1 se presentan expresiones y valores de los parámetros térmicos empleados en el modelo. En la Tabla 2 se muestran las propiedades del vapor. Las propiedades del grano y del lecho de trigo pueden consultarse en Balzi et al. (2008). La relación de equilibrio sorpcional se expresó por medio de la ecuación de Henderson-Thompson (Brooker et al., 1992). En la Tabla 3 se presentan los datos correspondientes a proceso respiratorio del grano (oxidación de la hexosa).

Coef. de trans. de calor [W/m ² °C]	$h_{c3} = 8.6 \frac{V^{0.6}}{L^{0.4}} \quad h_{c2} = 0.5h_{c3}$ $h_{c4} = 1$
Temperatura del aire en el cono superior del silo [°C]	$T_{silos}(t) = T_{amb}(t) + 5$
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 y Beckman, 1980; Mills, 1995)

Difusividad del vapor de agua [m ² /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 2: Propiedades del vapor de agua (Giner et al., 1996; Singh et al., 1993)

Oxidación de la hexosa	CO ₂ producidos en la respiración del trigo ¹ [mg CO ₂ /kg materia seca en 24 hs]	Pérdida de material seca [mg de m s/kg ms en 24 hs]	Materia seca perdida (MSP)
$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2835 \text{ kJ} / \text{mol}$ $180 \text{ gr} + 192 \text{ gr} \rightarrow 264 \text{ gr} + 108 \text{ gr} + 2835 \text{ kJ}$	$Y_{CO_2} = 10^{RCO_2}$ $\log RCO_2 = -4.054 + 0.0406T - 0.0165\theta + 0.0001\theta^2 + 0.2389M$ $\theta = \text{tiempo de almacenamiento (días)}$	$d_m = \frac{180}{264} Y_{CO_2}$	$MSP = \int_0^t d_m dt$

Tabla 3: Respiración del trigo (¹White et al., 1982)

En la Figura 2 se grafica la temperatura media del grano de los tres silos para valores de la permeabilidad $K_1 = 5.96 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ (Khankari et al., 1995), $K_2 = 2K_1 = 11.92 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ y $K_3 = 10K_1 = 5.96 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ a fin de considerar la variabilidad que presenta en general este parámetro en las diferentes variedades de granos (maíz $K = 3.5\text{-}16.1 \cdot 10^{-9}$, soja $K = 18.5 \cdot 10^{-9}$). De esta gráfica se observa que debido a la baja permeabilidad del trigo, para los valores K_1 y K_2 el efecto de la convección no es significativo durante los 5 primeros meses. Sobre el final del periodo (finales de Julio), el enfriamiento global del trigo es levemente mayor. Con un aumento en un orden de magnitud de la permeabilidad (K_3) la temperatura promedio descienden a 21°C, 22°C y 23°C para los silos S1, S2 y S3, respectivamente. Aún para este valor extremo de la permeabilidad, el enfriamiento natural no es suficiente para llevar a la masa de granos a condiciones seguras de almacenamiento (temperaturas inferiores 18°C evitan el desarrollo de insectos) siendo necesario recurrir a la aireación.

Con los valores de la temperatura y del contenido de humedad del grano se determinó la humedad relativa de equilibrio del aire intersticial (HRE) empleando la relación de Henderson Thompson. La Figura 3 muestra la evolución de la HRE promedio para la los tres silos. El valor se mantiene por debajo del 67.5%, inferior al umbral para el desarrollo de hongos de 75%. Para un dado contenido de humedad, la HRE disminuye con la temperatura por lo cual para las temperaturas de almacenamiento inferiores los riesgos de desarrollo de hongos serán aún menores.

Los resultados anteriores corresponden a condiciones globales de almacenamiento. A continuación se presentan los patrones de flujo, distribución de la temperatura y de humedad del grano ensilado que permiten localizar las zonas con condiciones más desfavorables para la conservación de los granos.

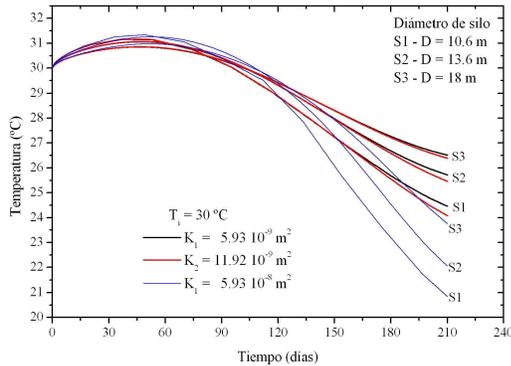


Figura 2: Evolución de la temperatura media de grano. Influencia de la permeabilidad del grano y dimensión del silo.

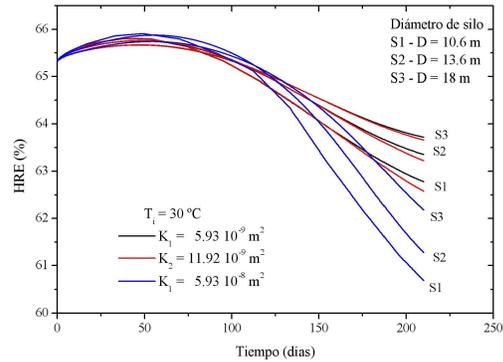


Figura 3: Evolución de la humedad relativa de equilibrio (HRE). Influencia de la permeabilidad del grano y dimensión del silo.

La Figura 4a muestra la distribución de la función de corriente al cabo de algunos meses para el silo S1 de diámetro 10.8 m (un valor positivo de la función de corriente corresponde a una circulación en sentido horario). Al cabo de un mes (fin de Enero) se establece una circulación en sentido antihorario con un valor máximo de la función de corriente de $\psi_{max} = -11 \text{ m}^3/\text{d}$ y de la velocidad vertical $v_z = 4.65 \text{ m/d}$ sobre la pared lateral. En Marzo se observan dos celdas con sentidos opuesto de circulación, característico de la etapa de inversión ($\psi_{max} = 2 \text{ m}^3/\text{d}$; $v_z = -2 \text{ m/d}$). Al final del mes de Julio las corrientes alcanzan los valores máximos ($\psi_{max} = 34 \text{ m}^3/\text{d}$; $v_z = -10 \text{ m/d}$).

La Figura 4b muestra la distribución de isotermas. Los gradientes de temperatura se concentran sobre la pared lateral y en la superficie de los granos. Al cabo de un mes (fin de Enero) el aumento de temperatura es del orden de 5°C en una capa de aproximadamente 1 m de espesor cercana a la chapa y al borde superior. La convección natural en sentido antihorario desplaza las isotermas de la capa superior hacia el interior del silo y las curva levemente en el extremo inferior. A fines del mes de Julio la convección natural logra enfriar unos pocos grados la parte inferior del silo, pero temperaturas favorables para el desarrollo de insectos (mayores a 18°C) persisten en la zona central ($r < 4 \text{ m}$; $0 \text{ m} < z < 12 \text{ m}$).

La Figura 4c muestra la distribución del contenido de humedad de los granos. La migración de humedad predicha no provoca una redistribución que comprometa el límite de seguridad en relación al desarrollo de hongos, ya que la humedad de equilibrio (HRE) resulta en todo el silo inferior al 75%. Esta migración es del orden de 0.3-0.4% b.h. y se encuentra muy concentrada en la capa periférica. A fin de Julio se observa una leve disminución en la parte inferior y una acumulación en la capa superior, característica del período invernal.

El factor que más influye en el desarrollo de las corrientes de convección es la permeabilidad. Para S1, un aumento en un factor 10 en el valor de la permeabilidad incrementa los valores máximos al final del mes de Julio a $\psi_{max} = 200 \text{ m}^3/\text{d}$ y $v_z = 106 \text{ m/d}$. La zona inferior del silo llega a condiciones de almacenamiento favorable pero la temperatura en la zona central ($r < 4 \text{ m}$; $3 \text{ m} < z < 13 \text{ m}$) sigue siendo elevada. La combinación del transporte de masa difusivo opuesto a los gradientes de temperatura y el sentido de circulación horario provoca acumulación de humedad en la esquina superior derecho del silo por encima del 16% b.h. La Figura 5 a-c muestra los resultados para el silo de mayor diámetro S3 y $K_3 = 10 K_1$; en este caso los valores máximos en Julio llegan a $\psi_{max} = 510 \text{ m}^3/\text{d}$ y $v_z = 140 \text{ m/d}$.

Para un dado valor de la permeabilidad, al aumentar el diámetro del silo (disminuir la razón de aspecto), las líneas de corriente, distribución de isotermas y migración de la humedad presentan patrones similares, nuevamente con un aumento de los valores máximos de la función de corriente. El aumento del diámetro produce un aumento de la resistencia térmica creando gradientes de temperaturas más pronunciados en la capa cercana a la pared lateral externa. Como los gradientes de temperatura en sentido radial son las fuerzas impulsoras de las corrientes de convección natural, estas resultan más intensas.

En forma adimensional el aumento de la permeabilidad o del radio del silo implica un aumento del número de Rayleigh del medio poroso (ver nomenclatura), motor de las corrientes de convección natural.

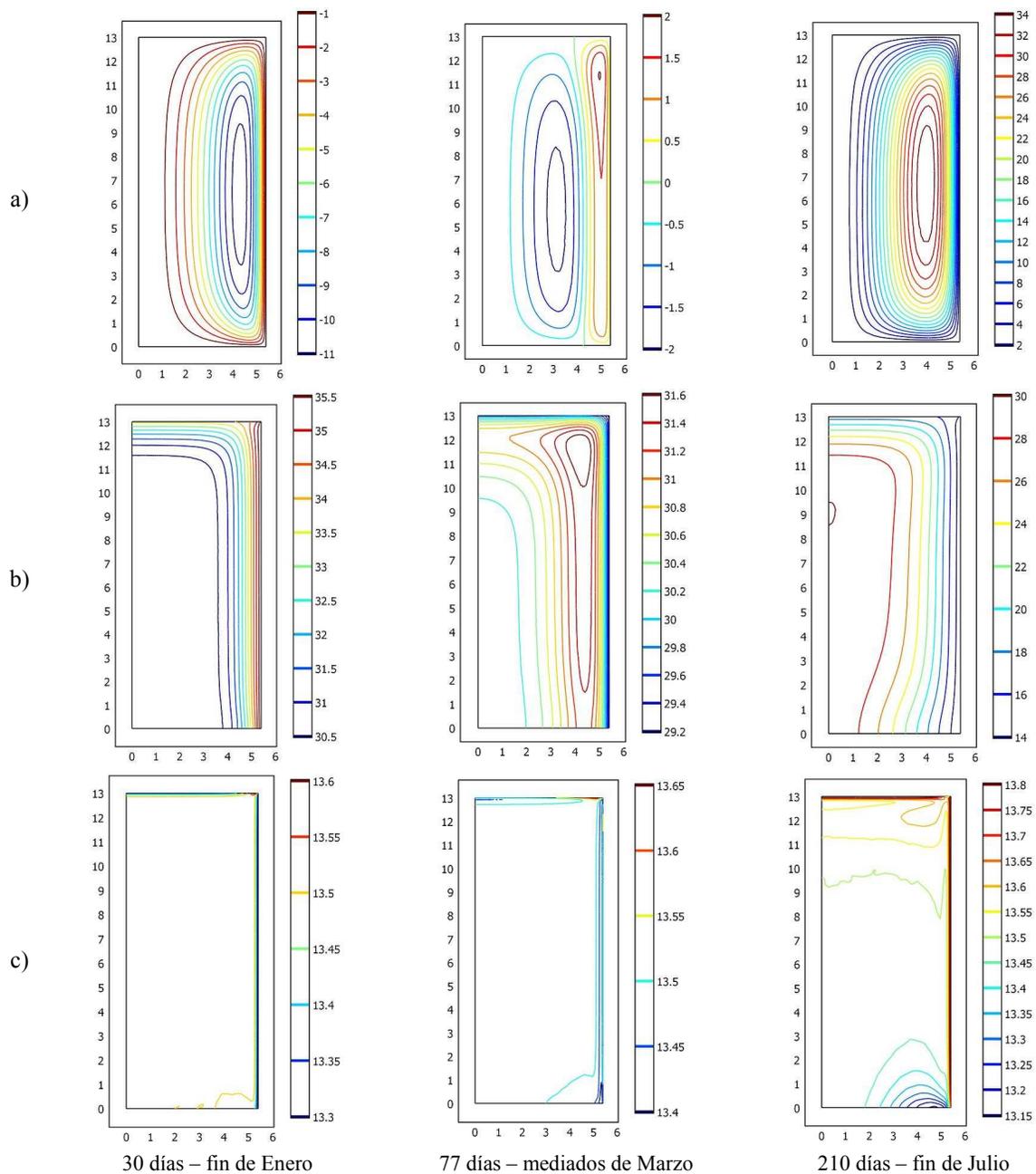


Figura 4: Distribución de (a) la función de corriente, (b) la temperatura y (c) el contenido de humedad para el silo S1 y permeabilidad K_I , durante el almacenamiento.

En la Figura 6 se presenta la distribución de la humedad relativa de equilibrio del aire intersticial (HRE). Para el silo de menor tamaño (S1) y permeabilidad K_I no se producen zonas propicias para el desarrollo de hongos ($HRE > 75\%$). En el otro caso (S3 y K_3) la concentración de humedad en la esquina superior genera un foco propicio para el deterioro ($HRE > 75-80\%$).

Finalmente, la Figura 7 presenta la distribución de la pérdida de materia seca del grano (MSP) almacenado. La pérdida de materia seca puede evaluarse a partir del dióxido de carbono generado durante el proceso metabólico de respiración (ver Tabla 3). Esta producción depende del contenido de humedad y de la temperatura del grano. Como el contenido de humedad inicial del grano corresponde a la humedad de recibo (grano seco a 13.5% b.h.) la respiración es baja a pesar del aumento de temperatura. Las distribuciones de MSP muestran que los valores acumulados no superaron el límite admitido para el trigo de aproximadamente 0.1%, localizándose en la zona superior de la masa de granos que presenta las temperaturas más altas.

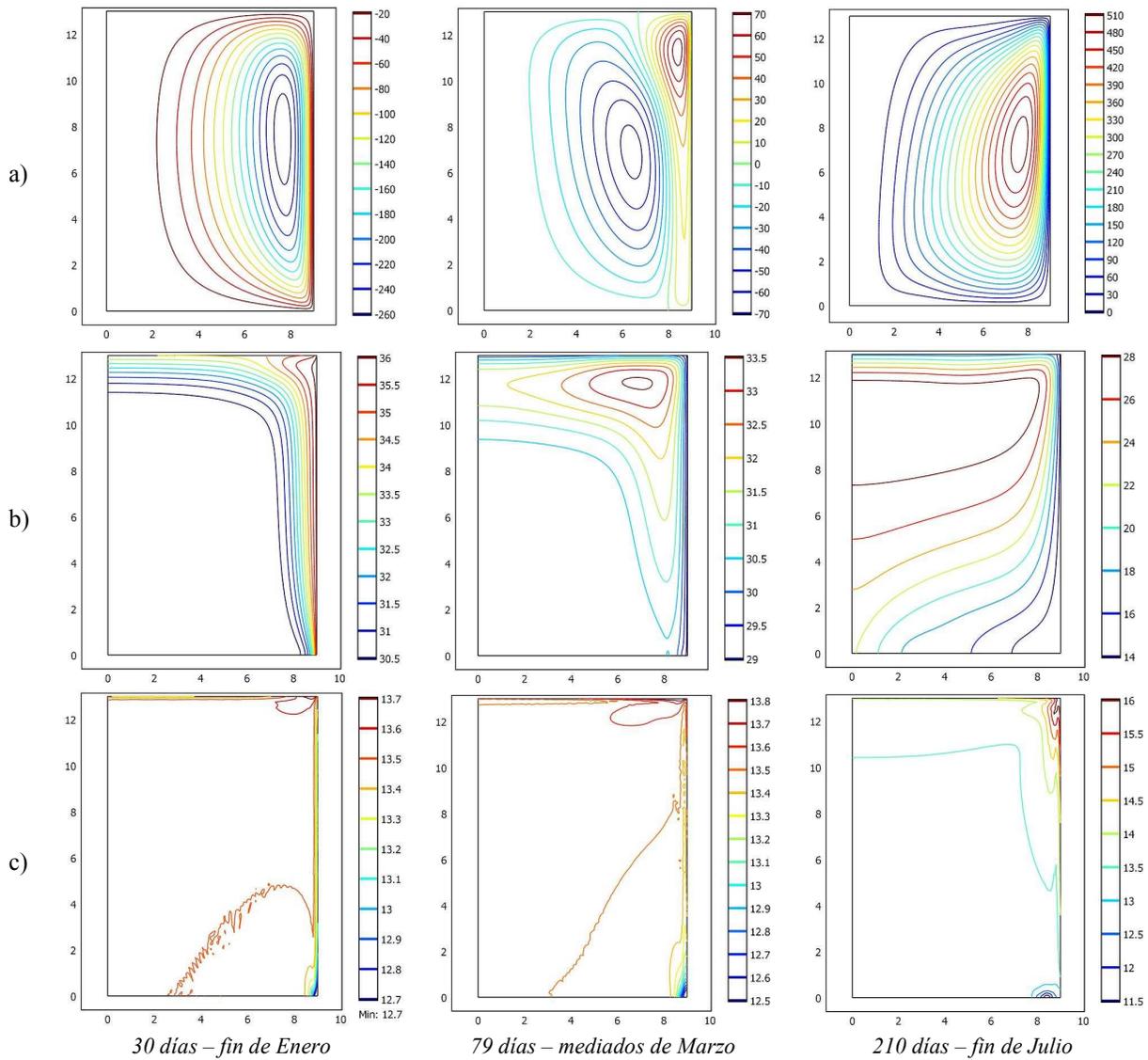


Figura 5: Distribución de (a) la función de corriente, (b) la temperatura y (c) el contenido de humedad para el silo S3 y permeabilidad $K_3 = 10K_1$, durante el almacenamiento.

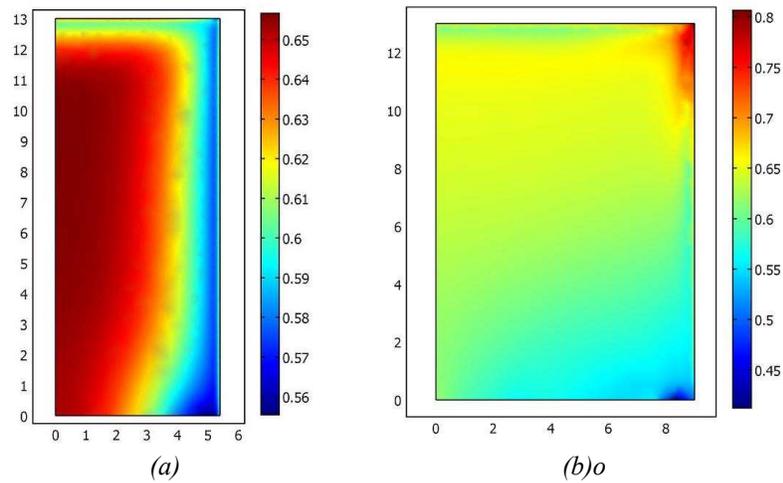


Figura 6: Distribución de la humedad relativa de equilibrio del aire intersticial, para (a) el silo S1 – K_1 y (b) el silo S3 – K_3 .

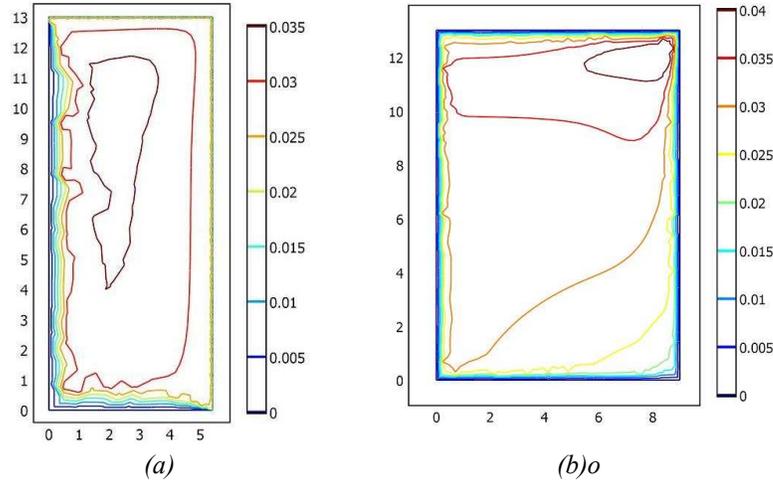


Figura 7: Distribución de la pérdida de materia seca del grano (MSP) almacenado, para (a) el silo S1 – K₁ y (b) el silo S3 – K₃.

CONCLUSIONES

En este trabajo se describe un modelo bidimensional axisimétrico de transferencia de calor, masa y momento en granos almacenados en un silo convencional. Permite predecir la evolución de la distribución de temperatura, la migración de la humedad y la humedad relativa de equilibrio del aire intergranario como consecuencia de la variación de las condiciones climáticas estacionales. Además evalúa cómo influye la evolución de estas variables en la pérdida de materia seca del grano almacenado.

El modelo fue resuelto mediante el método de elementos finitos y utilizado para analizar el almacenamiento de trigo a 13.5% b.h (15.6% b.s.) y 30°C, durante 210 días en el período verano-invierno. Se analizó la influencia de las dimensiones del silo y la permeabilidad de lecho en los patrones de flujo, distribución de isoterms e isolíneas de humedad del grano ensilado.

En los casos analizados, para una temperatura de almacenamiento de 30°C, el enfriamiento natural es insuficiente para llevar al grano por debajo de los 18°C, siendo necesario recurrir a la aireación. La migración de humedad no provoca una redistribución de la humedad que comprometa el límite de seguridad (HRE > 75%). Los cambios registrados en el contenido de humedad son del orden de 0.5% b.h. La pérdida de materia seca tampoco superó los valores admisibles de 0.1% para el trigo.

La permeabilidad es el factor que más influye en la migración. Un aumento en un factor 10 puede producir una acumulación de humedad en la zona superior del silo llegando a contenidos del orden del 17%, cuando el grano inicialmente fue almacenado con la humedad de recibo o comercialización (13.5% b.h.), creando zonas propicias para el desarrollo de hongos.

NOMENCLATURA

r, z	coordenadas cilíndricas (m)	n	dirección normal a la frontera
c_b	calor específico del lecho de granos (J/kg K)	p_s	presión de saturación del vapor de agua (Pa)
C_{Ht}, K_H, N	constantes de la Ec. de Henderson Thompson	p_v	presión de vapor de agua en el aire intergranario (Pa)
D_v	difusividad del vapor de agua en el aire (m ² /s)	q_H	calor liberado en el proceso de respiración, 10.738 J/mg CO ₂ producidos
$D_{ef} = \frac{D_v \varepsilon}{R_V \tau T_k}$	difusividad efectiva del vapor de agua (m ² /s)	q_w	vapor de agua generado en la respiración, 4.09 10 ⁻⁵ kg H ₂ O/mg CO ₂ producidos
$f(W_g, T)$	curva de sorción-desorción	$Ra = \frac{K \rho \beta g}{\mu \alpha_{eff}} (T_H - T_C) R = Ra_{\beta} Da$	nro Rayleigh del medio poroso
G_0, G_3	radiación solar incidente sobre la superficie horizontal y superficie Γ_3 (W/m ²)	$Ra = \frac{K \rho \beta g}{\mu \alpha_{eff}} (T_H - T_C) R^3$	nro Rayleigh del fluido
hc	coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² °C)	R_v	constante de vapor de agua, (461.52 J/kg°C)
k_b	conductividad térmica del lecho (W/mK)	t	tiempo (s)
K	permeabilidad del lecho de granos (m ²)	T, T_k	temperatura (°C), (K)
L	longitud característica (m)	T_{amb}	temperatura ambiente (°C)
L_g	calor de desorción del agua en el grano (J/kg)	T_{cielo}	temperatura de cielo (°C)
M	contenido de humedad del grano (base húmeda, kg / kg grano húmedo)	T_{silo}	temperatura del aire en cavidad superior del silo (°C)
Nu	número de Nusselt, (f : convección forzada; n : convección natural)		

T_0	temperatura inicial de los granos (°C)	ξ	emisividad
V	velocidad del viento (m/s)	τ	tortuosidad del lecho de granos
v_r, v_z	componentes r y z de la velocidad del aire a través del lecho (m/s)	σ	constante de Stefan-Boltzmann, $5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
W_g	contenido de humedad del grano (base seca, kg / kg grano seco)	η	cambio de p_v respecto al contenido de humedad, a temperatura constante, (Pa)
W_0	contenido de humedad inicial de los grano (base seca, kg / kg grano seco)	ω	cambio de p_v respecto a la temperatura, a contenido de humedad constante, (Pa/K)
Y	CO ₂ producidos en la respiración (mg CO ₂ /kg materia seca en 24 hs)	Ψ	función de corriente (m ³ /s)
α	absortividad	Γ	frontera del dominio
β	coef. de expansión térmica del aire (°C ⁻¹)	ρ_b	densidad del lecho de granos (kg/m ³)
ε	porosidad (m ³ de aire/ m ³ de lecho)	μ	viscosidad del aire (kg/ms)

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.
- Andrade E., Couto S. M., Queiroz D. y Faroni L. (2002). Three dimensional simulation of the temperature variation in corn stored in metallic bin. *ASAE Annual Meeting*, Paper N°02-3150.
- 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.
- Balzi U., Gastón A., Abalone R. M. (2008). Efecto de la convección natural en la distribución de temperatura y migración de humedad en granos almacenados en silos. Aceptado en ENIEF 2008. *Mecánica Computacional* Vol. XXVI.
- 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 N. 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.
- Khankari K. K., Morey R. V. y Patankar S. V. (1995). Application of a numerical model for prediction of moisture migration in stored grain. *Trans. of ASAE*, 38(6): 1789-1804.
- Mills A. F. (1995). *Transferencia de Calor*. Editorial Irwin.
- Montross D. M., Maier D. E. y Haghghi K. (2002). Development of a finite-element stored grain ecosystem model. *Trans. of ASAE*, 45(5): 1455-1464.
- Navarro S. y Noyes R. (2002). *The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management*. CRC Press.
- Nield D. A. y Bejan A. (1992). *Convection In Porous Media*. Springer-Verlag, USA.
- Slattery J. C.. *Momentum, Energy and Mass Transfer in Continua*. McGraw-Hill, Kogakusha LTD, 1972.
- Singh A. K., Leonardi E. y Thorpe G. R. (1993). A solution procedure for the equations that govern three-dimensional free convection in bulk stored grains. *Trans. of ASAE*, 36(4): 1159-1173, 1993.
- Sinício R., Muir W. E. (1998). Aeration strategies for preventing spoilage of wheat stored in tropical and subtropical climates. *Applied Engineering in Agriculture*, 14(5): 512-527.
- Sinício R. y Muir W. E. (1996). Comparison of mathematical models to simulate aeration of wheat stored in Brazil. *J. Agricultural Engineering. Research*, 64: 119-130.
- White N. D. G., Sinha R. N. y W. E. Muir (1982). Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat. *Canadian Agricultural Eng.*, 24(1): 35-42.

ABSTRACT

In this work, a 2D finite element momentum, heat and mass transfer model was applied to predict natural convection currents, temperature distribution and moisture migration in wheat stored at 13%w.b. and 30 °C in a cylindrical bin without aeration from summer to winter for the weather conditions of Rosario. The effect of the bin size and grain permeability on natural convection currents development was evaluated and grain storability conditions were predicted. In all cases, natural cooling was insufficient to bring the grain to safety temperature below 18°C, being necessary aeration practices. Moisture migration was low and interstitial equilibrium relative humidity remained below the threshold for mold development (HRE > 75%). Permeability has the strongest effect on natural convection development and a ten fold increase of this parameter promoted the development of spoilage areas in the upper part of the bin.

Keywords: soybean, wheat, grain storage, momentum, heat and mass transfer, numerical simulation