

## MODELIZACION DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD EN GRANOS ALMACENADOS EN SILOS-BOLSA

Analia Gastón<sup>a,b</sup>, Rita Abalone<sup>b,c</sup>, Armando Cassinera<sup>c</sup>, Miguel. A. Lara<sup>c,d</sup>

<sup>a</sup>Consejo de Investigaciones Universidad Nacional de Rosario, [analiag@fcei.unr.edu.ar](mailto:analiag@fcei.unr.edu.ar),

<sup>b</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Av. Pellegrini 250. (2000) Rosario, [rabalone@fceia.unr.edu.ar](mailto:rabalone@fceia.unr.edu.ar),

<sup>c</sup>Instituto de Física Rosario (CONICET-UNRosario), 27 de Febrero 210 bis, 2000 Rosario, Argentina, [cassinera@ifir.edu.ar](mailto:cassinera@ifir.edu.ar)

<sup>d</sup>Facultad de Ciencias Agraria, Campo Experimental Villarino C.C. N°. 14 (S 2125 ZAA) Santa Fe, Argentina, [malara@fceia.unr.edu.ar](mailto:malara@fceia.unr.edu.ar)

**Palabras claves:** Silo-bolsa, Almacenamiento de granos, Transferencia de calor y materia, Simulación numérica.

**Resumen.** En este trabajo se describe un modelo bidimensional para predecir la evolución de la distribución de temperatura y la migración de la humedad de una masa de granos almacenados en un silo bolsa por efecto de los gradientes térmicos generado por las variaciones de las condiciones climáticas estacionales. Las ecuaciones de balance de energía y masa fueron resueltas por el método de elementos finitos. La comparación de las temperaturas predichas por el modelo con mediciones experimentales de un ensayo a campo muestran un acuerdo razonable. Estos valores son fuertemente dependiente de la radiación solar incidente poniendo de manifiesto la necesidad de contar con un registro riguroso de esta magnitud para futuras aplicaciones del modelo. Se analizó la influencia del empleo de promedio diarios y valores horarios de la temperatura ambiente y radiación solar en las predicciones de la temperatura y la humedad para un período de 30 días de almacenamiento. Finalmente se simuló el embolsado de trigo de Diciembre a Julio (período verano-invierno) para las condiciones climáticas de la zona de Rosario empleando promedios diarios de los datos climáticos. Las predicciones indican que la temperatura de la zona central de la bolsa es la menos sensitiva a los cambios estacionales, mientras que una zona cercana a la superficie de aproximadamente 20 cm, que involucra aproximadamente el 20% del grano embolsado, registra importantes variaciones generando zonas propicias para el deterioro.

## 1 INTRODUCCION

En Argentina, de una producción total de 90 millones de toneladas de granos, 25 millones se almacenan en los llamados silos-bolsa, una novedosa herramienta tecnológica a la hora de almacenar granos y semillas a campo.

Esta técnica consiste en el almacenamiento de granos en bolsas plásticas herméticas, donde el proceso respiratorio de los seres vivos del granel (ecosistema formado por granos, hongos, insectos, etc.) consume el oxígeno (O<sub>2</sub>) y genera dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). La constitución de esta nueva atmósfera, rica en CO<sub>2</sub> y pobre en O<sub>2</sub>, suprime, inactiva o reduce la capacidad de reproducción y/o desarrollo de insectos y hongos, como así también la propia actividad del grano, facilitando su conservación.

Los silos-bolsa tienen 2,70 m de diámetro y 60-75 m de largo, pudiéndose almacenar aproximadamente unas 200 toneladas de grano. La estructura de la bolsa está compuesta por tres capas, con el interior color negro y la exterior color blanco con estabilizadores para los rayos ultravioletas. Su espesor puede ser de 230 a 250 micrones y fue diseñada para una producción de dos años aunque lo normal es que los productores guarden su grano durante seis u ocho meses. La [Figura 1](#) muestra una foto del almacenamiento de granos a campo en silos-bolsa.

El almacenaje en silo de bolsas plásticas realizado sin el asesoramiento correcto, acerca de llenado de la bolsa con eliminación de aire, límite de humedad del grano, según el tiempo de permanencia y la temperatura de almacenaje, puede ocasionar pérdidas importantes de peso hectolítrico y de la calidad del grano almacenado.

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. Gradientes de temperatura dentro de la masa de granos producen la migración de la humedad desde las zonas más calientes a las más frías y esta redistribución puede generar focos con condiciones propicias para el deterioro del grano.

La modelización numérica resulta ser una herramienta de gran utilidad para predecir el deterioro potencial en comparación con un costoso monitoreo de la temperatura y de la humedad, que en el caso del silo bolsa es de difícil implementación. Existen numerosas referencias sobre modelización de sistemas de almacenamiento convencionales. Pueden mencionarse en trigo [Alagusundaram et al. \(1990\)](#); [Jayas et al. \(1994\)](#); [Jia et al. \(2000b, a\)](#); [Jiang et al. \(2005\)](#); [Abbouda et al. \(1992b, a\)](#); [Chang et al. \(1993, 1994\)](#); [Singh et al. \(1993\)](#); [Khankari et al. \(1995b, a; 1994\)](#); en sorgo [Jiménez-Islas et al. \(2004\)](#); en arroz, [Iguaz et al. \(2004b, a\)](#) y [Abe y Basunia \(1996\)](#); en maíz [Andrade et al. \(2002\)](#).

Con referencia a los silos-bolsa, la mayoría de los trabajos realizados hasta el momento han sido experiencias de laboratorio, en bolsas a escala o de tamaño comercial, donde se trató de determinar el efecto de la humedad de almacenaje en la calidad de los granos de trigo, maíz y girasol. Estos trabajos son aproximaciones preliminares, ya que el comportamiento de la temperatura y la conformación del ambiente en el interior de las bolsas son diferentes en los experimentos a escala que en las bolsas de tamaño comercial. Estos trabajos experimentales fueron desarrollados principalmente por EEA-INTA-Balcarce, en Buenos Aires ([Rodríguez et al. 2004, 2002b, a, 2001](#)) y EEA-INTA-Manfredi en Córdoba ([Casini et al. 2006, 2003, Clemente et al. 2003](#)). Como este sistema es una adaptación local de una técnica para almacenar granos húmedos o forraje, no se encuentran trabajos de modelización publicados sobre estos sistemas.

En este trabajo se adaptó un modelo desarrollado para silos convencionales ([Abalone et al. 2006](#)) que sigue los lineamientos propuestos por [Khankari et al. \(1994\)](#) y [Montross et al. \(2002\)](#) para analizar los procesos de transferencia de calor y masa dentro del silo-bolsa.

Se realizó una primera validación mediante la comparación de los valores de temperatura predichos por el modelo con los medidos durante una experiencia de embolsado de trigo en la zona de Balcarce, Pcia de Buenos Aires, realizada por EEA-INTA-Balcarce (Rodríguez et al. 2002b, a).

Se realizó una simulación empleando valores horarios o promedios diarios de la temperatura ambiente y de la radiación solar incidente a los efectos de comparar las diferencias en las predicciones del modelo. Además, como ejemplo de aplicación, se analizó el embolsado de trigo en la zona de Rosario, una de las áreas agrícolas más importante del país.



Figura 1: Almacenamiento de granos en silos-bolsa

## 2 MODELO MATEMATICO

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

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
6. se considera despreciable la transferencia de energía en la dirección longitudinal de la bolsa adoptándose un modelo 2D con simetría plana

### 2.1 Balance de energía y contenido de agua:

Planteando el balance de energía y contenido de agua para los granos y el aire intergranario en un volumen de control se obtiene el siguiente sistema acoplado de un componente:

$$c_b \rho_b \frac{\partial T}{\partial t} = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left[ k_b \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_b \frac{\partial T}{\partial y} \right] \right] + \rho_b L_g \frac{\partial W}{\partial t} \quad \text{en } \Omega_1 \quad (1)$$

$$\rho_b \frac{\partial W_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{ef} \left( \eta \frac{\partial W_g}{\partial x} + \omega \frac{\partial T_k}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{ef} \left( \eta \frac{\partial W_g}{\partial z} + \omega \frac{\partial T_k}{\partial z} \right) \right] \quad \text{en } \Omega_1 \quad (2)$$

donde la densidad y calor específico del medio poroso se definen mediante las expresiones:

$$c_b \rho_b = (1 - \varepsilon) c_g \rho_g, \quad \rho_b = (1 - \varepsilon) \rho_g = (1 - \varepsilon) \rho_{gs0} (1 + W_g), \quad k_b = (1 - \varepsilon) k_g$$

y la difusividad efectiva del vapor de agua a través del lecho de granos (Keey, 1975) como:

$$D_{ef} = \frac{D_v \varepsilon}{R_v \tau T_k}$$

Una deducción detallada de este sistema de ecuaciones puede consultarse en Abalone et al. (2006). El último término de la ecuación (1) contabiliza la energía necesaria para evaporar el agua en la masa de granos.

La ecuación (2) establece que la variación del contenido de agua total en el volumen de control es igual a la difusión neta de vapor a través del espacio intergranario.

Expresando la relación de equilibrio sorpcional por medio de la ecuación de Henderson-Thompson (Brooker et al., 1992):

$$p_v = p_s \left\{ 1 - \exp \left[ -K_H (C_H + T) (100W_g)^N \right] \right\} \quad (3)$$

se obtienen las expresiones correspondientes para  $\eta$  y  $\omega$ :

$$\eta = \left. \frac{\partial p_v(W_g, T)}{\partial W_g} \right|_T = p_s \exp \left[ -K_H (C_H + T) (100W_g)^N \right] \left[ -K_H (C_H + T) (100W_g)^{N-1} (100W_g) \right] \quad (4)$$

$$\omega = \left. \frac{\partial p_v(W_g, T)}{\partial T} \right|_{W_g} = \frac{p_v}{p_s} \frac{dp_s}{dT} + p_s (K_H (100W_g)^N) \left( 1 - \frac{p_v}{p_s} \right) \quad (5)$$

La Figura 2 muestra la aproximación de la geometría del silo-bolsa y el dominio de cálculo.

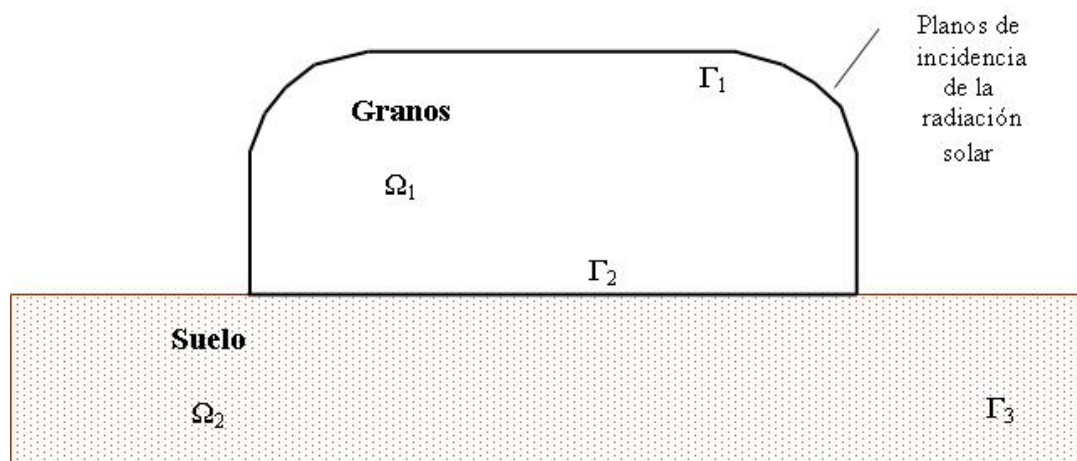


Figura 2: Dominio de cálculo.

La condición inicial y las condiciones de contorno asociadas a la ecuación (1) son:

$$T(x, y, t=0) = T_0(x, y) \quad (6)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_c (T - T_{amb}) + \alpha G - \xi \sigma (T^4 - T_{cielo}^4) \text{ en } \Gamma_1 \quad (7)$$

Se definieron 11 planos de incidencia sobre el contorno  $\Gamma_1$  del silo-bolsa para el cálculo de la radiación solar  $G$ .

Se incorporó en el modelo de transferencia de calor la interacción entre la base del silo-bolsa y el suelo. En este subdominio ( $\Omega_2$ ) se consideró que tanto la temperatura inicial como la temperatura del contorno ( $\Gamma_3$ ) están prescritas por una ley propuesta  $T_{suelo}$  (ver [Tabla 1](#)).

$$T = T_{suelo}(y, t) \text{ en } \Gamma_3 \quad (8)$$

Las condiciones asociadas a la ecuación (2) son:

$$W_g(x, y, t=0) = W_0(x, y) \quad (9)$$

$$\frac{\partial p_v}{\partial n} = 0 \Rightarrow \eta D_{ef} \frac{\partial W_g}{\partial n} = -\omega D_{ef} \frac{\partial T}{\partial n} \text{ en } \Gamma_1 + \Gamma_2 \quad (10)$$

La condición (10) 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.

## 2.2 Solución numérica

La resolución numérica del sistema acoplado formado por las ecuaciones (1) y (2) con sus correspondientes condiciones iniciales y de contorno se efectuó por el método de los elementos finitos, utilizando un software de uso profesional. La discretización del dominio se realizó con una densificación de la malla sobre la frontera del dominio, donde se concentran los mayores gradientes de temperatura y humedad, como se muestra en la [Figura 3](#). Se emplearon elementos Lagrangianos de orden dos, e integración numérica de cuarto orden.

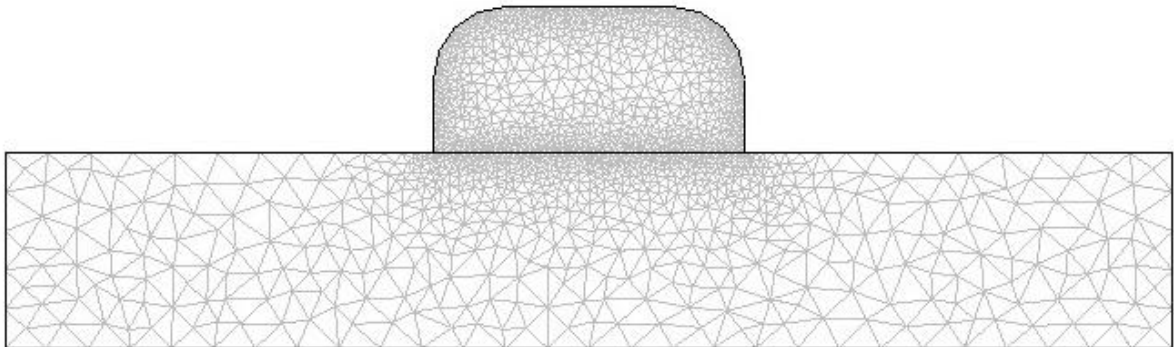


Figura 3: Discretización del dominio de cálculo.

## 3 RESULTADOS OBTENIDOS

El silo se orientó en la dirección N-S a los efectos de calcular la radiación solar sobre los distintos planos de incidencia. La irradiancia solar global sobre una superficie horizontal fue calculada en base al modelo C ([Iqbal, 1983](#)) de transferencia radiativa de la atmósfera, utilizando parámetros atmosféricos estándares para la zona considerada.

En la [Tabla 1](#) se listan expresiones y valores de los parámetros del modelo de transferencia de calor. En la [Tabla 2](#) y en la [Tabla 3](#) figuran los parámetros relacionados con la transferencia de masa.

Coef. de trans. de calor [W/m <sup>2</sup> C] (Mills, 1995)	$h = \frac{k_a}{L} \left( \overline{Nu}_f^{1/2} + \overline{Nu}_n^{1/2} \right)$
Temperatura de suelo (Carslaw y Jaeger, 1959)	$T_{suelo} = T_1(y) + T_2 \exp\left(-y \sqrt{\frac{2\Omega}{\alpha_{ts}}}\right) \left[ \cos\left(\Omega t - y \sqrt{\frac{2\Omega}{\alpha_{ts}}} - \phi\right) \right]$
Temperatura de cielo (Mills, 1995)	$\sigma T_c^4 = \xi_c \sigma T_{amb}^4$
Emisividad del cielo (Mills, 1995)	$\xi_c = 0.82$
Emisividad del silo-bolsa Absortividad del silo-bolsa	$\xi = 0.6$ $\alpha = 0.26$

Tabla 1: Parámetros del modelo térmico

Densidad del lecho de trigo [kg/m <sup>3</sup> ] (Giner, 1999)	$\rho_b = 824$
Porosidad del lecho (Giner, 1999)	$\varepsilon = 0.38$
Cond. térmica del grano de trigo [W/mK] (Keey, 1975)	$k_g = 0.14 + 0.68W$
Calor esp. de grano de trigo [J/kg K] (Nellist, 1987)	$c_g = 1300 + 4187W$
Ecuación de Henderson (10) [Pa] (Brooker, 1992)	$K_H = 2.31 \cdot 10^{-5}$ ; $C_H = 55.813$ $N = 2.2857$
Tortuosidad (Keey, 1975)	$\tau = 1.53$

Tabla 2: Propiedades del grano y lecho de trigo

Difusividad del vapor de agua [m <sup>2</sup> /s] (Thorpe, 1980)	$D_V = \frac{9.1 \cdot 10^{-9} (T_k)^{2.5}}{(T_k + 245.18)}$
Presión de saturación del vapor [Pa] (Giner et al., 1996)	$p_s = \exp\left\{ 54.12 - \frac{6547.1}{T_k} - 4.230 \ln T_k \right\}$

Tabla 3: Propiedades del vapor de agua

### 3.1 Comparación de resultados numéricos con mediciones experimentales

En la estancia San Lorenzo, de Zubiaurre S.A., en el partido de Tandil, provincia de Buenos Aires, la EEA INTA Balcarce (Rodríguez et al. 2002a) realizó un ensayo almacenando granos de trigo (ProINTA–Isla Verde) en silos-bolsa, con dos contenidos de humedad diferentes durante un período de 150 días a los efectos de estudiar la evolución de diferentes parámetros de calidad en el tiempo. Los ensayos comenzaron en el momento de cosecha del grano y se extendieron durante un total de 150 días aproximadamente. Los

resultados que se presentan en este trabajo corresponden a trigo almacenado el 2 de enero de 2001 a 43.5C y 17% bh.

La recolección de muestras para determinar el contenido de humedad se realizó al comienzo del ensayo, a los 45 días, a los 80 días y al finalizar el ensayo (150 días). Las muestras se tomaron perforando la bolsa con un calador sonda, discriminadas según tres profundidades (superior, media e inferior). El seguimiento de la temperatura se realizó mediante dataloggers que colectaron valores de temperatura horarias durante todo el período del ensayo así como la variación de la temperatura ambiente.

El modelo numérico fue empleado para simular la evolución de la temperatura durante el primer mes (enero) de almacenamiento.

Las propiedades físicas del trigo empleadas en la simulación figuran en la [Tabla 2](#). Debido a que no se contó con valores de la radiación solar incidente, esta fue estimada a partir de condiciones estándar para la zona con nubosidad variable obtenida de datos climatológicos registrados durante el ensayo.

La reflectancia y la absorbancia de la bolsa en el rango solar ([Tabla 1](#)) fueron determinadas experimentalmente en el INENCO (UNS-CONICET).

Las temperaturas predichas en la parte inferior ( $y = 0.2$  m), en el medio ( $y = 0.8$  m) y zona superior ( $y = 1.45$  m) de la bolsa fueron comparados con los valores experimentales como se muestra en la [Figura 4](#). El registro de las temperaturas media e inferior presenta un comportamiento anómalo a los 15 días de iniciado el ensayo cuya causa se desconoce. Si bien la gráfica muestra una aproximación sinusoidal de la temperatura ambiente, la simulación se realizó interpolando linealmente los valores medidos.

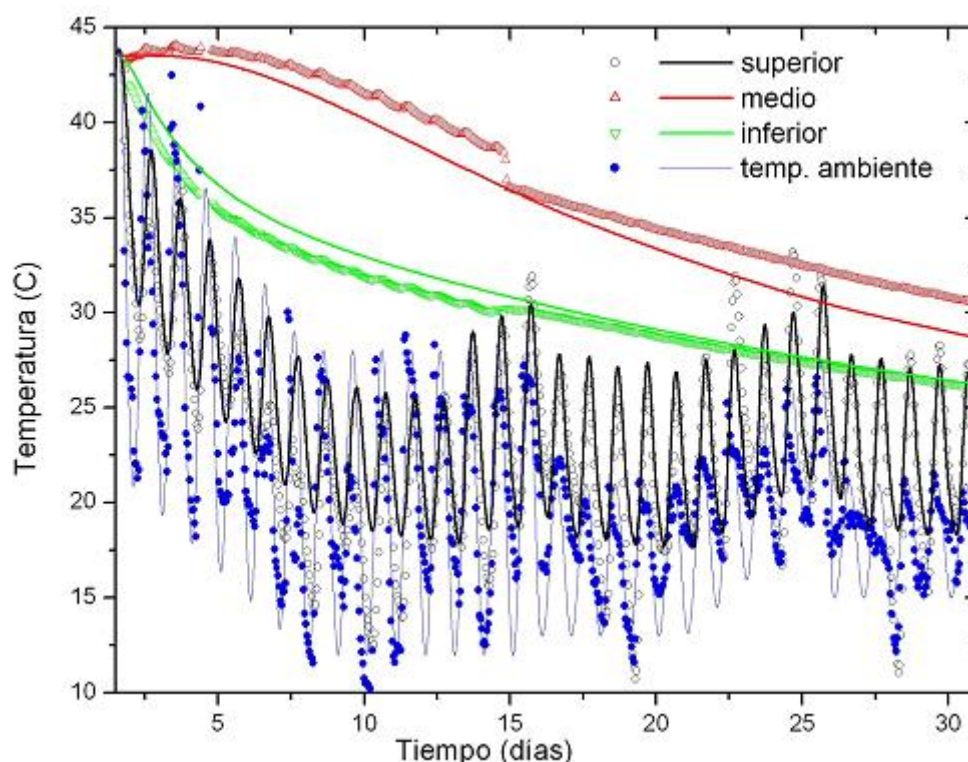


Figura 4: Comparación de la temperatura medida y predicha en el interior del silo-bolsa durante el mes de enero de 2001 (primer mes de almacenamiento).

Se observa que la temperatura superior tiende a seguir las fluctuaciones de la temperatura ambiente. La influencia de la radiación solar incidente puede verse claramente en la [Figura 5](#) y [Figura 6](#). Durante los días de cielo claro la temperatura en la parte superior resulta del orden

de 7C mayor que la ambiente mientras que en los días nublados esta diferencia es del orden de dos grados. Durante las noches la temperatura simulada en la superficie resultó generalmente superior a la medida lo que indica la necesidad de revisar las correlaciones propuestas para las pérdidas convectivas producidas por el viento, dato climatológico no registrado durante el ensayo. Puede concluirse que globalmente el modelo es capaz de reproducir el comportamiento de la temperatura durante el período analizado.

Dado que el contenido de humedad no puede registrarse en forma continua durante el ensayo, no se realizó una comparación de la evolución de esta variable.

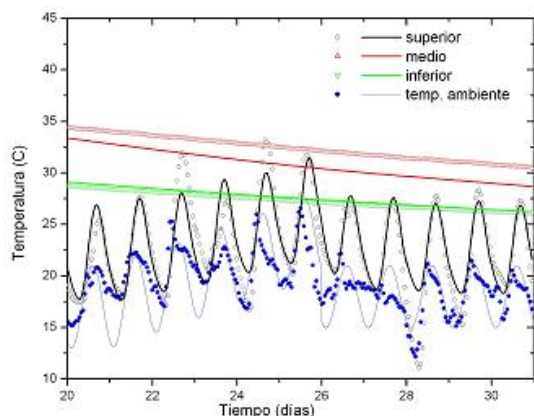


Figura 5: Comparación de mediciones y predicciones de la evolución de la temperatura durante una secuencia días soleados

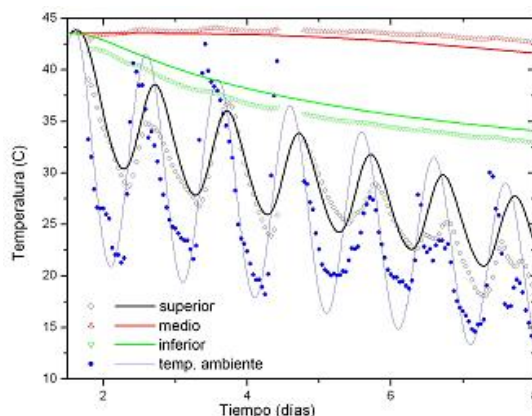


Figura 6: Comparación de mediciones y predicciones de la evolución de la temperatura durante una secuencia días nublados

### 3.2 Comparación de resultados empleando valores horarios y promedios diarios de la temperatura ambiente y la radiación solar

Tanto la temperatura ambiente como la radiación solar incidente presentan variaciones diarias y estacionales. En consecuencia se analizó la influencia de estos valores en la simulación de la temperatura y contenido de humedad del grano en el almacenamiento durante el mes de Enero.

En un caso, se propuso una temperatura ambiente promedio, de 30C con una variación de 10C entre el mediodía y la noche, con un período de 24 horas. En el otro, se adoptó un promedio anual de 20C con una variación de 20C entre verano e invierno, con un período de 365días. Con respecto a la radiación solar incidente se consideró la variación diaria típica de días de cielo claro y los valores promedios diarios correspondientes al mes de enero. Estas condiciones representan las de máxima radiación incidente sobre el silo bolsa.

La variación horaria de la temperatura ambiente y la radiación incidente afecta significativamente una zona de aproximadamente 20 cm por debajo de la superficie del silo bolsa. La Figura 7 muestra el perfil vertical de temperatura del grano en el centro del silo para distintos instantes de tiempo durante el último día de almacenamiento. En el mediodía solar la temperatura resulta aproximadamente 12C mayor a la calculada con los valores promedios diarios. La Figura 8 muestra la redistribución de humedad asociada a estos gradientes térmicos.

La Figura 9 muestra la evolución de la temperatura del grano en dos puntos cercanos a la superficie de la bolsa. A 5 cm por debajo de la bolsa las diferencias de temperatura son del orden de 7C disminuyendo a 1C a 20 cm. Con respecto al contenido de humedad, la Figura 10 muestra una mayor migración de humedad al considerar variaciones horarias de los datos climáticos siendo las diferencias del orden de 0.2% bh.



En un análisis posterior se evaluará como estas diferencias en los valores de la temperatura y contenido de humedad influyen en el cálculo de la pérdida de materia seca, parámetro de calidad que define el tiempo de almacenamiento seguro del grano.

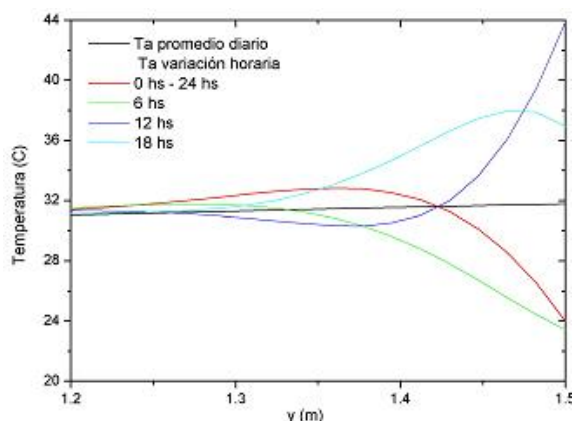


Figura 7: Comparación del perfil de la temperatura simulada empleando datos horarios y promedios diarios de la temperatura ambiente y la radiación.

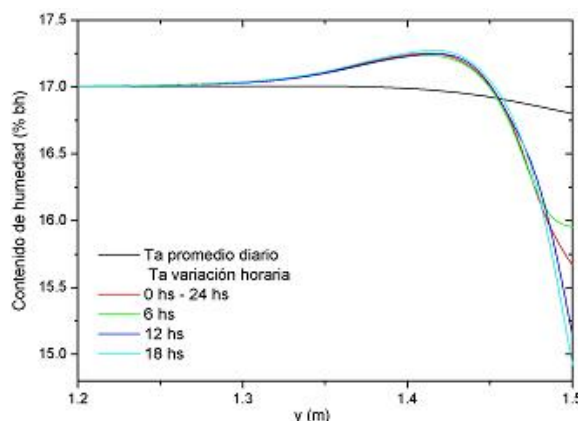


Figura 8: Comparación del perfil del contenido de humedad simulada empleando datos horarios y promedios diarios de la temperatura ambiente y la radiación.

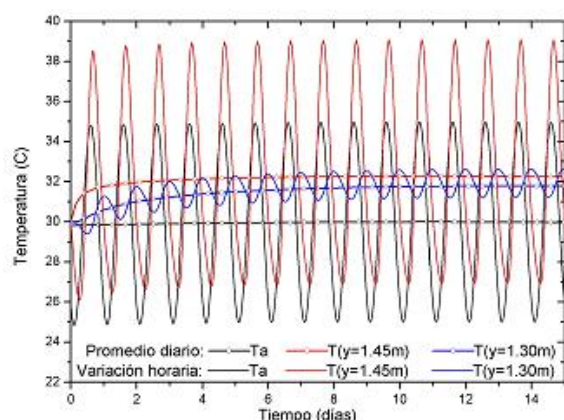


Figura 9: Comparación de la evolución de la temperatura simulada empleando datos horarios y promedios diarios de la temperatura ambiente y la radiación.

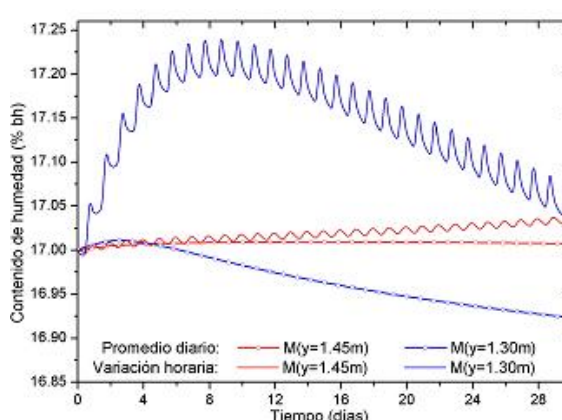


Figura 10: Comparación de la evolución del contenido de humedad simulado empleando datos horarios y promedios diarios de la temperatura ambiente y la radiación.

### 3.3 Simulación del almacenamiento de trigo en la zona agrícola de Rosario

Como ejemplo ilustrativo, se utilizó el modelo para analizar la variación de la temperatura y la migración de la humedad en el almacenamiento trigo de diciembre a julio para las condiciones climáticas de la zona agrícola de Rosario. Los contenidos de humedad inicial considerados fueron de 13 a 17% bh (base húmeda) ya que estos valores definen el rango que se incluyen en las tablas de recomendaciones elaboradas por el INTA para el embolsado.

Respecto a las condiciones climáticas, se emplearon promedios diarios de la temperatura y humedad relativa ambiente y de la velocidad del viento, obtenidos a partir de promedios estadísticos del período 1981-1990 en la ciudad de Rosario. Se consideró la radiación solar incidente correspondiente a días de cielo claro ya que representa la condición de almacenamiento más desfavorable.

La Figura 11 muestra la combinación de las condiciones de contenido de humedad y temperatura de los granos favorables para el desarrollo de hongos e insectos. Además la

humedad relativa intergranaria debe permanecer por debajo del 70% para evitar el crecimiento microbiano. En base a esta información pueden detectarse las zonas de potencial deterioro en el almacenamiento.

El proceso respiratorio de granos, hongos, insectos, etc. consume el oxígeno ( $O_2$ ), generando dióxido de carbono ( $CO_2$ ) dentro de la bolsa, hasta que se constituye una nueva atmósfera que inactiva la capacidad de reproducción y/o desarrollo de insectos y hongos, como así también la propia actividad del grano. Sin embargo es necesario evaluar el nivel de deterioro producido durante el período que involucra alcanzar esta atmósfera inerte, cuando se presentan condiciones propicias de temperatura y humedad.

La **Figura 12** presenta la distribución de la temperatura del grano de trigo al final del almacenamiento. De estas gráficas podemos concluir que la disminución de la temperatura ambiente durante el período invernal no alcanza a propagarse hacia la zona central del silo logrando enfriar el grano hasta temperaturas más seguras para el almacenamiento. En este gráfico se indica un corte longitudinal en la zona central para el cuál se analizará la evolución de la temperatura, el contenido de humedad del grano y la humedad relativa del aire intergranario.

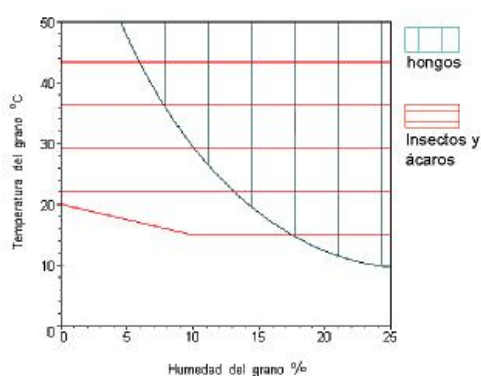


Figura 11: Humedad y temperatura favorables para el desarrollo de hongos e insectos

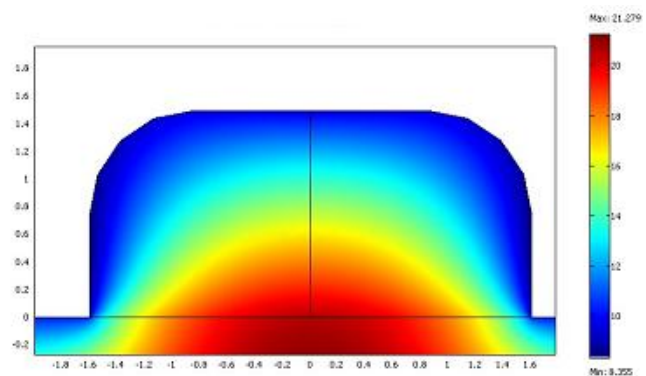


Figura 12: Distribución de temperatura de trigo almacenado a 17%, 200 días.

La **Figura 13** resume los resultados para el embolsado de grano a la humedad de recibo (13% bh). Las condiciones iniciales de embolsado corresponden al almacenamiento seguro (humedad relativa menor al 70%). Durante los meses del verano, el aumento de temperatura registrado en la bolsa genera una migración de la humedad que no compromete estas condiciones de seguridad.

Durante los meses de invierno el enfriamiento del grano lo sitúa en condiciones de almacenamiento aún más segura en cuanto al desarrollo de hongos y actividad microbiana. No obstante la temperatura en la base de la bolsa no disminuye por debajo de los 18C lo cual representa un riesgo en el desarrollo de insectos si el grano no se embolsó libre de infestación.

La **Figura 14** muestra los resultados obtenidos para el embolsado de grano húmedo (17% bh). En este caso las condiciones iniciales no corresponden a las de seguridad, por lo tanto el riesgo de deterioro es alto. La acción de la radiación solar aumenta este riesgo.

Durante los meses de invierno, si bien la temperatura disminuye, la humedad relativa del aire intergranario se mantiene mayor a 80%. Particularmente en estos casos es importante calcular la pérdida de materia seca porque permitirá determinar más precisamente el tiempo de almacenamiento seguro, definido como el tiempo para el cual esta pérdida es del 0.5%.

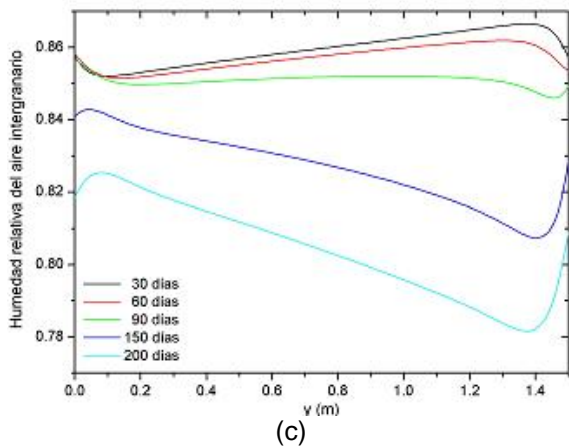
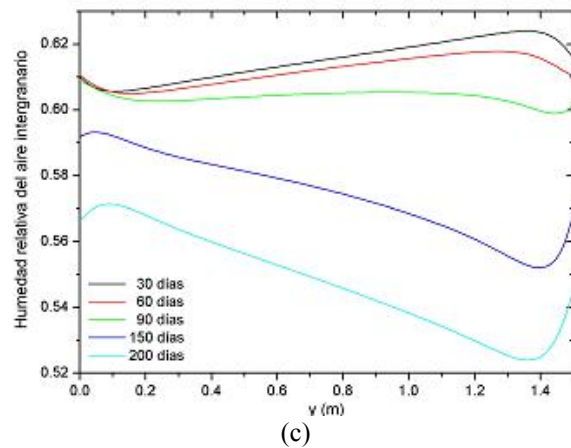
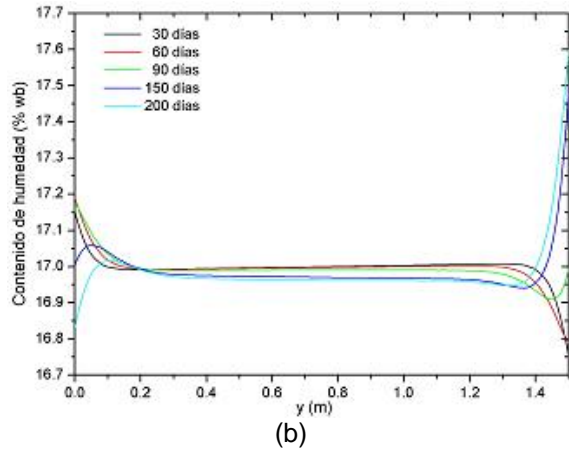
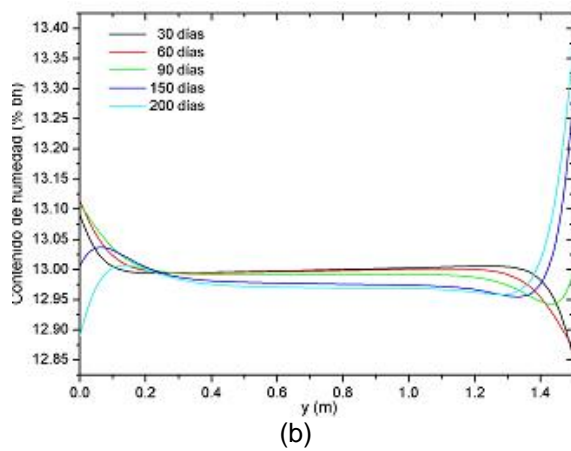
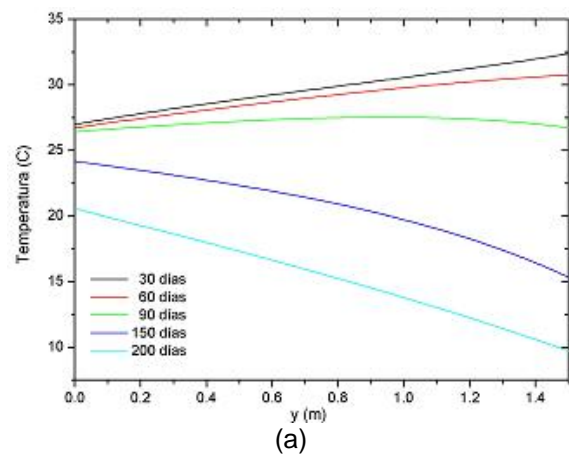
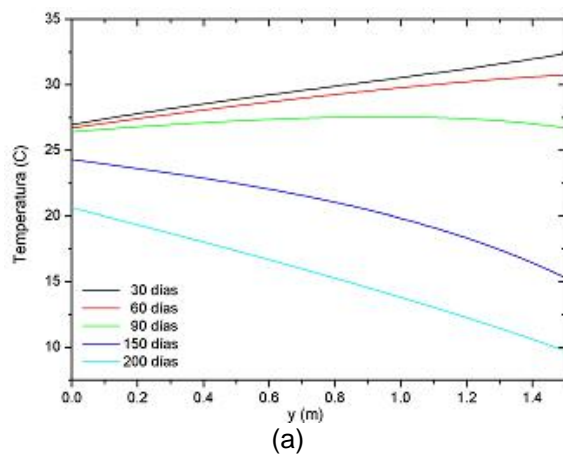


Figura 13: Trigo almacenado a 13%  
a) temperatura, b) contenido de humedad y  
c) humedad relativa del aire intergranario

Figura 14: Trigo almacenado a 17%  
a) temperatura, b) contenido de humedad y  
c) humedad relativa del aire intergranario

#### 4 CONCLUSIONES

En este trabajo se describe un modelo de transferencia de calor y masa bidimensional axisimétrico para predecir la evolución de la distribución de temperatura y la migración de la humedad de una masa de granos almacenados en un silo-bolsa por efecto de las variaciones climáticas estacionales. Este modelo tiene como principal hipótesis el equilibrio sorpcional

entre la masa de granos y el aire intergranario. Fue resuelto mediante el método de elementos finitos.

Se realizó una primer validación comparando las predicciones del modelo con mediciones de la temperatura de una experiencia realizada a campo. Globalmente se obtuvo buena concordancia quedando de manifiesto la influencia de los datos de la radiación solar incidente sobre la calidad de la predicción.

Como ejemplo de aplicación se analizó el almacenamiento de trigo a 30C con contenidos de humedad inicial en el rango de 13 a 17% bh de Diciembre a Julio, durante 200 días.

Los resultados de la simulación indican que en una zona de aproximadamente 20 cm cercana a la superficie, que involucra aproximadamente el 20% del grano embolsado, se producen grandes cambios de temperatura siguiendo las fluctuaciones de las condiciones ambientales. La zona central de la bolsa resulta ser la menos sensitiva, por lo tanto si la temperatura inicial de embolsado es alta los granos no alcanzan a enfriarse por efecto de los cambios ambientales.

La próxima etapa en la modelización es la incorporación de la respiración de los granos para evaluar la pérdida de materia seca durante el embolsado, uno de los parámetros de calidad más importantes relacionados con la comercialización. Así mismo, debe analizarse el efecto de las corrientes de convección natural que generan los gradientes de temperatura en la migración de la humedad.

Actualmente las recomendaciones de embolsado elaboradas por el INTA se basan en experiencias a campo. Las recomendaciones referentes a las distintas frecuencias de muestreo, varían según las condiciones de humedad del grano, condiciones de embolsado y época del año. Los lapsos que se mencionan son orientativos y de utilidad sólo si el silo-bolsa visualmente mantiene su integridad física. En la medida que el almacenamiento se aparte de las condiciones óptimas, mayor debe ser la frecuencia de muestreo con el fin de detectar cuanto antes el deterioro de calidad.

El monitoreo sistemático del silo-bolsa permite prevenir, diagnosticar y solucionar los problemas antes de que se afecte la calidad del grano. Paralelamente, un modelo de simulación validado, equivalente a un embolsado virtual, representa una herramienta complementaria que aportará información relevante para la toma de decisiones basadas en principios de ingeniería.

## **AGRADECIMIENTO**

Los autores expresan su agradecimiento al Dr. J.C. Rodríguez y al Dr. R. Bartosik del EEA INTA (Balcarce) quienes han suministrado los datos experimentales empleados en este trabajo.

## **NOMENCLATURA**

x, y	coordenadas cartesianas
$c_b$	calor específico del lecho de granos (J/kg K)
$c_g$	calor específico del grano (J/kg K)
$C_H$	constante 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	radiación solar incidente sobre la superficie del silo-bolsa ( $W/m^2$ )
$k_a$	conductividad térmica del aire (W/mK)

$k_b$	conductividad térmica del lecho de granos (W/mK)
$k_g$	conductividad térmica del grano (W/mK)
$K_H$	constante de la ecuación de Henderson Thompson
$L$	longitud característica del silo-bolsa (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)
$n$	dirección normal
$N$	constante de la ecuación de Henderson Thompson
$Nu$	número de Nusselt, ( $f$ : convección forzada; $n$ : convección natural)
$p_s$	presión de saturación del vapor de agua (Pa)
$p_v$	presión de del vapor de agua en el aire intergranular (Pa)
$R_v$	constante de vapor de agua, (461.52 J/kgC)
$t$	tiempo (s)
$T$	temperatura (C)
$T_k$	temperatura absoluta(K)
$T_{amb}$	temperatura ambiente (C)
$T_i$	valores anuales o diarios típicos de temperatura de suelo (C), $i = 1, 2$
$T_{cielo}$	temperatura de cielo (C)
$T_{suelo}$	temperatura de suelo (C)
$T_0$	temperatura inicial de los granos (C)
$W_g$	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 <sup>2</sup> C)
$\alpha$	absortividad del silo-bolsa
$\alpha_{ts}$	difusividad térmica del suelo (m <sup>2</sup> /s)
$\varepsilon$	porosidad (m <sup>3</sup> de aire/ m <sup>3</sup> de lecho)
$\xi$	emisividad del silo-bolsa
$\tau$	tortuosidad del lecho de granos
$\phi$	ángulo de desfase anual o diario
$\sigma$	constante de Stefan-Boltzmann, $5.6697 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
$\eta$	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)
$\Omega$	frecuencia angular anual o diaria (s <sup>-1</sup> )
$\Gamma$	frontera del dominio
$\rho_b$	densidad del lecho de granos (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_g$	densidad de grano húmedo (kg /m <sup>3</sup> )
$\rho_{gs0}$	densidad de grano seco (kg grano seco /m <sup>3</sup> (volumen grano seco))

## REFERENCIAS

- R.M. Abalone, A. Gastón, A. Cassinera y M.A. Lara. Modelización de la distribución de la temperatura y humedad en granos almacenados en silos. *Mecánica Computacional* **Vol. XXV**, 233-247, 2006.
- S.K., Abbouda, D.S. Chung, P.A. Seib y A. Song. Heat and mass transfer in stored milo. Part I: Heat transfer model. *Trans. of ASAE*, 35(5): 1569-1573, 1992a.
- S.K., Abbouda, D.S. Chung, P.A. Seib y A. Song. Heat and mass transfer in stored milo. Part II: Mass transfer model. *Trans. of ASAE*, 35(5): 1575-1580, 1992b.
- T Abe y M.A. Basunia. Simulation of temperature and moisture content changes during

- storage of rough rice in cylindrical bins owing to weather variability. *J. Agric. Engng. Res.*, 65: 223-233, 1996.
- ASAE Standards D241.4. *Density, Specific Gravity, and Mass-Moisture Relationships of Grain for Storage* American Society of Agriculture Engineers, St Joseph, MI, USA, 2003a.
- ASAE Standards D243.4. *Thermal Properties of Grain and Grain Products*. American Society of Agriculture Engineers, St Joseph, MI, USA, 2003b.
- E. Andrade, S.M. Couto, D. Queiroz y L. Faroni. Three dimensional simulation of the temperatura variation in corn stored in metallic bin. *ASAE Annual Meeting*. Paper N°02-3150, 2002.
- K. Alagusundaram, D.S. Jayas, N.D.G. White y W. E Muir. Three dimensional, finite element, heat transfer model of temperature distribution in grain storage bins. *Trans. of ASAE*, 33(2): 577-584, 1990.
- D. Brooker, F. W. Bakker-Arkema y C. W. Hall. *The Drying and Storage of Grains and Oilseeds*. Van Nostrand Reinhold, Avi Book, New York, 1992.
- H.S. Carslaw y J.C. Jaeger. *Conduction of heat in solids*. Oxford University Press, UK, 1959.
- C. Casini. Conservación de granos: almacenamiento en bolsas plásticas. EEA INTA Manfredi. Producción animal/Producción y manejo de forrajes conservados/granos. <http://www.produccionbovina.com/>. 2003.
- C. Casini. Tecnología en el Embolsado de Granos Secos - Almacenamiento de Granos: Bolsas Plástica INTA EEA Manfredi, <http://www.cosechaypostcosecha.org/>. 2006.
- G. Clemente, C. Casini, C. Pagliero, J. Quartucci. Efecto de la temperatura exterior sobre la atmósfera interior del sistema silo-bag durante el almacenamiento de granos. EEA. INTA Manfredi. <http://www.agriculturadeprecision.org/siembCoseAlma/Efecto%20Temperatura%20Exterior%20sobre%20Atmosfera%20Interior%20sobre%20silobag.htm>. 2003.
- C.S. Chang, H. Converse y J.L. Steele. Modeling of temperature of grain during storage with aeration. *Trans. of ASAE*, 36(2): 509-519. 1993.
- C.S. Chang, H. Converse y J.L. Steele. Modeling of moisture content of grain during storage with aeration. *Trans. of ASAE*, 37(6): 1891-1898, 1994.
- S.A. Giner; R.H. Mascheroni; M.N. Nellist 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): 1625-167, 1996.
- S.A. Giner. Diseño de secadoras continuas de trigo. Simulación de la transferencia de calor y materia y pérdida de calidad. *Tesis Doctoral*. Departamento de Ingeniería Química. UNLP, 1999.
- A. Iguaz, C. Arroqui, A. Esnoz y P. Vírseda. Modelling and validation of heat transfer in stored rough rice without aeration. *Biosystem Engineering*, 88(4): 429-439, 2004a.
- A. Iguaz, C. Arroqui, A. Esnoz y P. Vírseda. Modelling and simulation of heat transfer in stored rough rice with aeration. *Biosystem Engineering*, 89(1): 69-77, 2004b.
- M. Iqbal. *An introduction to solar radiation*. Academic Press, 1983.
- D.S. Jayas, K., Alagusundaram, G. Shunmugam, W.E. Muir y N.D.G. White. Simulated temperatures of stored grain bulks. *Canadian Agric. Eng.* **36**(4), 239-245, 1994.
- C. Jia, D.W. Sun y C. Cao. Finite element prediction of transient temperature distribution in a grain storage bin. *J. Agric. Eng. Res.*, 76: 323-330, 2000a.
- C. Jia, D.W. Sun y C. Cao. Mathematical simulation of temperature fields in a stored grain bin due to internal heat generation. *J. Food. Engineering*, 43: 227-233, 2000b.
- S. Jiang, D.S. Jayas, N.D.G. White y K. Alagusundaram. A three-dimensional, asymmetric, and transient model to predict grain temperatures in grain storage bins. *Trans. of ASAE*, 48(1): 263-271, 2005.

- H. Jiménez-Islas, J. Navarrete Bolaños y E. Betello-Alvarez. Estudio numérico de la convección natural de calor y masa 2D en granos almacenados en silos cilíndricos. *Agrociencia* 38: 325-342, 2004.
- K.K. Khankari., S.V. Patankar y R.V. Morey. A mathematical model for natural convection moisture migration in stored grain. *Trans. of ASAE*, 38(6): 1777-1787, 1995a.
- K.K. Khankari, R.V. Morey y S.V. Patankar. Application of a numerical model for prediction of moisture migration in stored grain. *Trans. of ASAE*, 38(6): 1789-1804, 1995b.
- K.K. Khankari, R.V. Morey y S.V. Patankar. Mathematical model for moisture diffusion in stored grain due to temperature gradients. *Trans. of ASAE*, 37(5): 1591-1604, 1994.
- R.B. Keey. *Drying Principles and Practice*. Pergamon Press, UK, 1975.
- A.F. Mills. *Transferencia de Calor*. Editorial Irwin, 1995.
- D.M. Montross, D.E. Maier y K. Haghighi. Development of a finite-element stored grain ecosystem model. *Trans. of ASAE*, 45(5): 1455-1464, 2002.
- M. E. Nellist. Modelling the performance of a cross-flow grain drier. *J. Agric. Eng. Res*, 37(1): 43-57, 1987.
- J.C. Rodríguez, R.E. Bartosik, H.D. Malinarich, J.P. Exilart, y M.E. Nolasco. Almacenaje de Granos en Bolsas Plásticas: Sistema Silobag. Informe Final de Girasol. EEA INTA Balcarce. <http://www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/posco/granos/silobag.htm>. 2001.
- J.C. Rodríguez, R.E. Bartosik, H.D. Malinarich. Informe preliminar sobre almacenaje de granos de trigo en bolsas plásticas: Sistema Silobag. *Jornada de Actualización Profesional - Trigo. 19*, Mar del Plata AR. EEA Balcarce. INTA Facultad de Ciencias Agrarias. UNMdP, Balcarce AR CIAM. Círculo de Ingenieros Agrónomos de Mar del Plata, 26-28. 2002a.
- J.C. Rodríguez, R.E. Bartosik, H.D. Malinarich, Maier D.E. Silobag: evaluation of a new technique for temporary storage of wheat in the field. *Proc. of the 8th Int. Working Conference on Stored Products Protection*, York, England, 1018-1023, 2002b.
- J.C. Rodríguez, R.E. Bartosik, H.D. Malinarich, J.P. Exilart, y M.E. Nolasco. IP Short term storage of Argentine cereals in Silobags to prevent spoilage and insects. *Proc. of the Int. Quality Grain Conference*, 1-15, 2004.
- A.K. Singh, E. Leonardi y G.R. Thorpe. A solution procedure for the equations that govern three-dimensional free convection in bulk stored grains. *Trans. of ASAE*, 36(4): 1159-1173, 1993.
- G. R. Thorpe. Moisture diffusion through bulk grain. *J. Stored Products. Res.*, 18: 9-12, 1980.