

Análisis Numérico de la Distribución de Temperatura y Humedad Durante el Almacenamiento de Granos en Silos Metálicos en el Bajío Mexicano

Numerical Analysis of Temperature and Moisture Distribution During Grain Storage in Metal Silos in the Bajío Region of Mexico

Fernando Iván Molina Herrera¹, Hugo Jiménez-Islas¹, Nora Eloísa Maldonado Sierra²

¹Tecnológico Nacional de México en Celaya, Departamento de Ingeniería Bioquímica y Ambiental. Antonio García Cubas Pte # 600, esq. Ave. Tecnológico, Celaya, Gto. C.P. 38010. México.

²Departamento de Ingeniería en Alimentos, Universidad Politécnica de Guanajuato, Av. Universidad Sur 1001, Cortázar, Gto., 38496, México;

*Autor de correspondencia: fi.molina@ugto.mx

Resumen

Este trabajo presenta un análisis numérico tridimensional de la convección natural durante el almacenamiento poscosecha de maíz y trigo en un silo metálico cilíndrico con techo y fondo cónico, ubicado en el Bajío, México, con capacidad para 450 toneladas de maíz o 420 de trigo. El modelo matemático incluye fluctuaciones ambientales de temperatura, radiación solar y orientación, además de las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía bajo la aproximación de Boussinesq. También incorpora el equilibrio higroscópico aire-grano mediante isothermas de sorción y la generación de calor metabólico por respiración. Las ecuaciones se resolvieron mediante el método de elementos finitos para analizar la variación de temperatura y humedad del grano y del aire intersticial durante diciembre. Los resultados muestran que el maíz, por su mayor difusividad térmica, desarrolla un núcleo central más cálido (≈ 32 °C), mientras que en el trigo el calor se concentra en la parte superior (≈ 29 °C). En ambos casos, la radiación solar eleva las temperaturas superficiales hasta 41 °C, generando gradientes térmicos y humedad relativa $>70\%$ en zonas periféricas, condiciones que favorecen la proliferación de hongos e insectos. Estos hallazgos destacan la importancia de estrategias de monitoreo y ventilación focalizada para mejorar la conservación poscosecha.

Palabras clave: silo, maíz, trigo, convección natural.

Introducción

El almacenamiento de granos en silos es una etapa crítica en la cadena agroalimentaria, pues de él depende la conservación de la calidad nutricional y sanitaria de productos destinados al consumo humano y animal. Entre los cereales más relevantes destacan el maíz y el trigo, pilares de la seguridad alimentaria por su valor nutricional, adaptabilidad y papel como base de la dieta en diversas regiones. Además, son materias primas clave para la industria alimentaria, pecuaria y de biocombustibles, lo que hace esencial un almacenamiento seguro para reducir pérdidas poscosecha y evitar deterioro por hongos e insectos. Los silos metálicos se han consolidado como la principal opción de almacenamiento por su capacidad de resguardar grandes volúmenes, facilidad de manejo y resistencia a condiciones externas [1-3]. Sin embargo, la temperatura y la humedad son los factores más determinantes para la calidad del grano, pues regulan la respiración, el desarrollo de plagas y la formación de zonas críticas por condensación [5-7]. Su distribución ocurre principalmente mediante convección natural, generada por gradientes térmicos y de humedad, tanto internos como inducidos por el ambiente. Diversos estudios han modelado este fenómeno mediante ecuaciones de conservación en medios porosos, aportando herramientas útiles para estrategias de conservación [9,10]. No obstante, la mayoría se enfocan en un solo grano o en modelos bidimensionales, quedando pendiente un análisis comparativo entre maíz y trigo bajo condiciones climáticas reales. En este sentido, el objetivo de este estudio es analizar y comparar la convección natural en un silo metálico de escala industrial durante el almacenamiento de maíz y trigo por separado, considerando variaciones ambientales y radiación solar en diciembre, mes representativo de la cosecha en el Bajío mexicano.

Metodología

El presente estudio analiza un silo cilíndrico de acero galvanizado con techo y fondo cónico con un radio de 3 m y una altura de 18.7 m. Tanto el techo como el fondo cónico representan $\frac{1}{4}$ de la altura total del silo. Este sistema de almacenamiento se localiza en la región del Bajío, específicamente en la comunidad de San Miguel Emenguaro, municipio de Salvatierra, Guanajuato, México. El cual tiene una capacidad de 450 toneladas de maíz o 420 toneladas de trigo, y su localización cercana a las zonas de cultivo facilita que los productores realicen la cosecha en el momento adecuado, evitando demoras logísticas o saturación en instalaciones más alejadas. La Figura 1 muestra la estructura física del silo y el dominio computacional empleado en la simulación tridimensional.

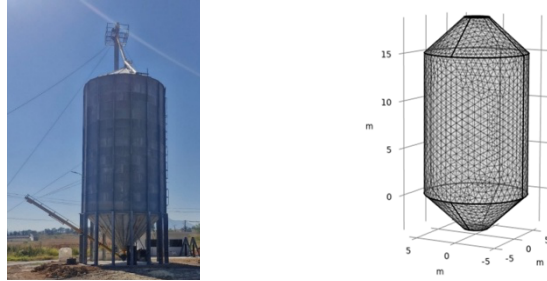


Figura 1. Estructura física del silo y dominio computacional.

Modelo Matemático

Las ecuaciones que gobiernan los procesos de transporte en un silo lleno de granos son las ecuaciones de continuidad, momentum, energía y materia. Aplicando los balances microscópicos a la fase discontinua ω (grano) y a la fase continua γ (aire intersticial), se obtienen las ecuaciones para un medio efectivo. Es importante mencionar que dichas ecuaciones son independientes del tamaño del silo o del tipo del grano almacenado, y únicamente se requiere conocer las propiedades físicas y termodinámicas específicas del grano considerado como la densidad, la porosidad, la capacidad calorífica, la conductividad térmica y la isoterma de equilibrio higroscópico y el tamaño del silo [11].

Ecuación de continuidad:

$$\rho_\gamma (\nabla \cdot \mathbf{u}_\gamma) = 0 \quad (1)$$

Ecuación de Momentum (Ley de Darcy con la extensión de Brinkman):

$$\frac{\rho_\gamma}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \mathbf{u}_\gamma}{\partial t} + (\mathbf{u}_\gamma \cdot \nabla) \mathbf{u}_\gamma \right) = \nabla \cdot [-P\mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u}_\gamma + (\nabla \mathbf{u}_\gamma)^T)] - \mu \kappa^{-1} \mathbf{u}_\gamma + \mathbf{g}\rho_\gamma \quad (2)$$

Ecuación de Energía:

$$(\rho c_p)_\gamma \left(\frac{\partial T_\beta}{\partial t} + \mathbf{u}_\gamma \cdot \nabla T \right) = k_{eff} \nabla^2 T_\beta + Q_0 - \lambda_v k_y \rho_y a_v (Y - Y_i) \quad (3)$$

Ecuación de Masa para humedad en el grano:

$$\rho_\omega \frac{\partial c_\omega}{\partial t} = D_\omega \nabla^2 c_\omega + P_0 - k_y \rho_y a_v (Y_i - Y) \quad (4)$$

Ecuación de Masa para humedad en el aire:

$$\frac{\partial c_\gamma}{\partial t} = D_\gamma \nabla^2 c_\gamma + k_y a_v (Y_i - Y) \quad (5)$$

El modelo matemático representado por las ecuaciones (1)–(5) fue utilizado para estudiar la convección natural que se manifiesta durante el almacenamiento independiente de maíz y trigo durante el mes de diciembre. Las expresiones matemáticas empleadas en dichas ecuaciones, así como las propiedades físicas detalladas incluyendo el calor de respiración, las isotermas de sorción y las humedades de equilibrio para

maíz y trigo, pueden consultarse en [11]. Por otra parte, el modelo de condiciones de frontera, que incorpora tanto la variación ambiental como el efecto de la radiación solar sobre las paredes del silo, se describe en [12].

Resultados y discusión

El modelo matemático permitió comparar la distribución de temperatura y humedad durante el almacenamiento de maíz y trigo en diciembre. Para el trigo se asumió un calor de respiración constante, mientras que en el maíz se consideró dependiente de la temperatura y humedad, lo que representa mejor la generación de calor metabólico. La Figura 2 muestra los perfiles radiales de temperatura: en el centro del silo, el maíz mantuvo temperaturas superiores a la ambiental en la madrugada y más bajas en las horas cálidas, confirmando el efecto aislante del grano y el desfase térmico reportado en la literatura [3-5]. A 1.5 m del centro se observó una transición hacia las condiciones externas, mientras que cerca de la pared (≈ 2.5 m) las temperaturas alcanzaron hasta 40 °C por la absorción de radiación solar en la lámina metálica, lo que convierte esta región en la más inestable. En el trigo los perfiles fueron similares, aunque con valores centrales ligeramente menores; sin embargo, en la periferia las temperaturas fueron equivalentes en ambos granos, confirmando que las condiciones externas dominan el comportamiento y favorecen la condensación de humedad y la proliferación de hongos [7,8].

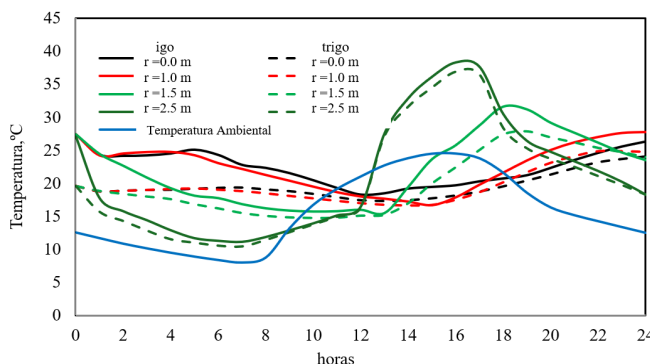


Figura 2. Comparación de los perfiles radiales de temperatura del maíz y trigo durante un día de almacenamiento en el centro del silo.

La Figura 3 muestra el efecto de la radiación solar a las 14:00 h, momento de máxima insolación, sobre la convección natural en el almacenamiento de maíz y trigo. En el maíz, la acumulación de calor en la pared este generó un gradiente térmico que impulsó flujos convectivos ascendentes en la zona irradiada. El aire caliente ascendió por el lado iluminado y desplazó aire más frío hacia el centro y la cara opuesta del silo, formando un ciclo de recirculación [3,4,6]. Este fenómeno favorece el enfriamiento localizado, pero también incrementa el riesgo de condensación cuando el aire húmedo entra en contacto con regiones frías, creando condiciones propicias para hongos. Los valores simulados (14.6–36.5 °C; 1.2×10^{-7} a 1.85×10^{-4} m³/día) confirman la magnitud del fenómeno. En el trigo, los contornos de temperatura y las líneas de corriente mostraron un patrón distinto: su mayor capacidad calorífica y menor difusividad térmica mantuvieron el centro más estable y fresco, con flujos simétricos y verticales [2,7]. Aunque este comportamiento parece favorable, también puede propiciar condensación en todo el volumen del silo. En conjunto, los resultados evidencian riesgos diferenciados: en el maíz, concentrados en zonas irradiadas, y en el trigo, distribuidos más uniformemente, lo que refuerza la necesidad de estrategias de ventilación específicas para cada grano [10].

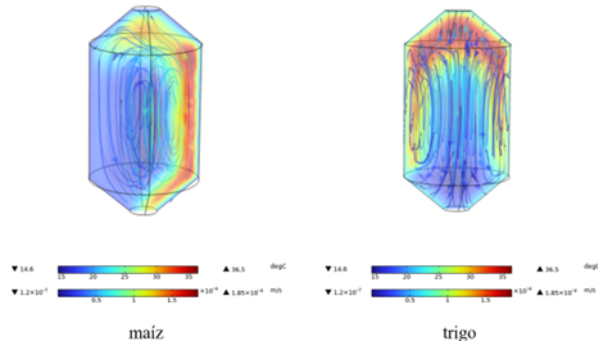


Figura 3. Comparación del efecto de la temperatura sobre la convección natural durante el almacenamiento de maíz y trigo durante la máxima radiación solar del día.

La Figura 4 muestra los contornos de temperatura al concluir el almacenamiento, el 31 de diciembre a las 00:00 h. En el maíz se forma un núcleo caliente central o “corazón térmico”, zona crítica por no recibir enfriamiento de las paredes ni ventilación efectiva, lo que favorece la acumulación de calor y humedad [7,8]. Los datos registran hasta 32.1 °C en el centro y 14.8 °C en las paredes, evidenciando un gradiente térmico significativo incluso sin radiación solar. En el trigo el corazón térmico se desplaza hacia la parte superior, con temperaturas de 29 °C, mientras que las zonas inferiores se mantienen en torno a 25 °C, debido a su mayor capacidad calorífica y menor difusividad térmica [11,12]. Aunque las paredes presentan valores similares a los del maíz (≈ 14.8 °C), en ambos granos las temperaturas internas superan los 25 °C durante la madrugada, creando junto con la condensación en las paredes frías condiciones favorables para hongos e insectos.

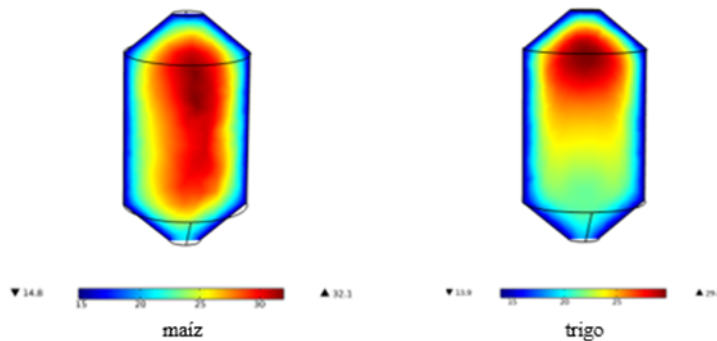


Figura 4. Comparación de los contornos de temperatura para el maíz y trigo al final del periodo de almacenamiento.

Conclusiones

El análisis numérico tridimensional mostró que el maíz tiende a desarrollar un núcleo central más cálido, mientras que en el trigo el calor se concentra en la parte superior; sin embargo, en ambos casos las paredes del silo alcanzan hasta 40 °C por efecto de la radiación solar, generando gradientes térmicos que elevan la humedad relativa por encima del 70 % en la periferia. Estas condiciones favorecen la proliferación de hongos e insectos, lo que confirma que las zonas cercanas a las paredes y las regiones internas con temperaturas mayores a 25 °C representan puntos críticos para el deterioro del grano. En este sentido, los resultados destacan la necesidad de aplicar estrategias de monitoreo y ventilación focalizada, adaptadas a las propiedades específicas del maíz y el trigo, para optimizar la conservación poscosecha y disminuir las pérdidas en sistemas de almacenamiento sin ventilación forzada.

Bibliografía/Referencias

- [1] Alagusundaram, K., Jayas, D. S., White, N. D. G., & Muir, W. E. (1990). Three-dimensional, finite element, heat transfer model of temperature distribution in grain storage bins. *Transactions of the ASAE*, 33(2), 577–584. <https://doi.org/10.13031/2013.31369>
- [2] Khankari, K. K., Morey, R. V., & Patankar, S. V. (1995). Application of a numerical model for prediction of moisture migration in stored grain. *Transactions of the ASAE*, 38(6), 1789–1804. <https://doi.org/10.13031/2013.28006>
- [3] Thorpe, G. (1997). Modelling ecosystems in ventilated conical bottomed farm grain silos. *Ecological Modelling*, 94(2–3), 255–286. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(96\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(96)00022-1)
- [4] Montross, M. D., Maier, D. E., & Haghighi, K. (2002). Validation of a finite element stored grain ecosystem model. *Transactions of the ASAE*, 45(5), 1455–1464. <https://doi.org/10.13031/2013.11042>
- [5] Andrade, E. T., Couto, S. M., Queiroz, D. M., Faroni, L. R. D., & Damasceno, S. M. (2002). Three-dimensional simulation of the temperature variation in corn stored in metallic bin. In Proceedings of the 2002 ASAE Annual International Meeting (Chicago, IL, July 28–31, 2002). <https://doi.org/10.13031/2013.9175>
- [6] Gastón, A., Abalone, R., Cassinera, A., & Lara, M. A. (2005). Predicción de la distribución de temperatura de granos almacenados en silos. *AVERMA*, 9, 13–18.
- [7] Lawrence, J., Maier, D. E., & Stroshine, R. L. (2013). Three-dimensional transient heat, mass, momentum, and species transfer in the stored grain ecosystem: Part I. Model development and evaluation. *Transactions of the ASABE*, 56(1), 179–188.
- [8] Wang, D., Liu, K., & Zhang, X. (2018). Modeling of a three-dimensional dynamic thermal field under grid-based sensor networks in grain storage. *IISE Transactions*, 51(5), 531–546. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1504356>
- [9] Panigrahi, S. S., Singh, C. B., & Fielke, J. (2020). CFD modelling of physical velocity and anisotropic resistance components in a peaked stored grain with aeration ducting systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 105820. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105820>
- [10] Li, X., Yang, K., Wang, Y., & Du, X. (2023). Simulation of fluid flow and heat-moisture transfer mechanism in packed bed based on double-diffusion model. *Chemical Engineering Communications*, 211(5), 647–663. <https://doi.org/10.1080/00986445.2023.2272183>
- [11] Molina-Herrera, F. I., Quemada-Villagómez, L. I., Calderón-Ramírez, M., Martínez-González, G. M., & Jiménez-Islas, H. (2025). Three-dimensional modeling of natural convection during postharvest storage of corn and wheat in metal silos in the Bajío region of Mexico. *Eng—Advances in Engineering*, 6(9), 224. <https://doi.org/10.3390/eng6090224>
- [12] Molina-Herrera, F. I., Quemada-Villagómez, L. I., Calderón-Ramírez, M., Martínez-González, G. M., & Jiménez-Islas, H. (2025a). Modeling temperature and moisture dynamics in corn storage silos: A comparative 2D and 3D approach. *Modelling—International Open Access Journal of Modelling in Engineering Science*, 6(1), 7. <https://doi.org/10.3390/modelling6010007>

