

MODELADO DEL GRADIENTE DE HUMEDAD DEL ARROZ DURANTE EL PROCESO DE SECADO

MODELING OF MOISTURE GRADIENT IN RICE DURING THE DRYING PROCESS

Germán Posada Ferreiro^a, Joselaine Cáceres Gonzalez^a, Laura García Llobidanin^b y Pedro Curto-Risso^a

^a*Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial, Facultad de Ingeniería Universidad de la República, Julio Herrera y Reissig 565, 11300 Montevideo, Uruguay, german.posada@fing.edu.uy, <https://www.fing.edu.uy/iimpi>*

^b*Latitud, fundación LATU, Avenida Italia 6201, 11500 Montevideo, Uruguay, lagarcia@latitud.org.uy, <https://latitud.org.uy/>*

Palabras clave: modelado de elementos finitos, gradiente de humedad, arroz, secado.

Resumen. El proceso industrial de la obtención del arroz comercializable presenta pérdidas de producción por distintos factores, uno de ellos es la fractura de granos de arroz. El quebrado está asociado al proceso de secado, donde se genera un gradiente de humedad entre las capas exteriores y el centro del grano, lo que genera tensiones que pueden fracturarlo o fisurarlo. Para comprender cómo se genera este gradiente de humedad se implementó un modelo de elementos finitos del proceso en COMSOL. Se utilizaron datos bibliográficos de las propiedades para comprender cómo afectan el proceso y cómo inciden en el gradiente de humedad. El modelo construido representa una buena descripción del proceso y permite comprender la incidencia de las distintas propiedades y la geometría en el gradiente de humedad, de esta manera se genera un producto que puede posteriormente modificarse incorporando las propiedades de las variedades de arroz cosechadas en Uruguay para poder optimizar las curvas de secado y disminuir la cantidad de granos quebrados.

Keywords: finite element modeling, moisture gradient, rice, drying.

Abstract. The industrial process of obtaining marketable rice faces production losses due to various factors, one of which is the fracturing of rice grains. This breakage is associated with the drying process, where a moisture gradient forms between the outer layers and the center of the grain, resulting in tensions that can lead to fracture or fissures. To understand how this moisture gradient forms, a finite element model of the process was implemented in COMSOL. Bibliographical data of properties were used to comprehend how they affect the process and contribute to the moisture gradient. The constructed model effectively represents the process and allows us to understand how different properties and geometry influence the moisture gradient. This process leads to the creation of a product that can be subsequently adjusted by incorporating the properties of rice varieties harvested in Uruguay, in order to be able to optimize the drying curves and reduce the quantity of broken grains.

1 INTRODUCCIÓN

El arroz es uno de los alimentos más consumidos a nivel mundial y forma parte de la dieta de la mayoría de la población. A su vez, representa una fuente de trabajo e ingresos significativa en la economía nacional, siendo el segundo producto agrícola más exportado en el 2021, posicionando a Uruguay como el séptimo país entre los mayores exportadores a nivel mundial (Uruguay XXI, 2022). Es por esto de gran importancia mejorar la productividad y eficiencia tanto del cultivo como del procesamiento posterior.

El arroz está compuesto por tres capas: el endospermo, el salvado o afrechillo y la cáscara. El endospermo es la parte mayoritaria y está formado principalmente por gránulos de almidón. Rodeando el endospermo se encuentra una capa delgada, el salvado o afrechillo, con un alto contenido de materia grasa. Finalmente, la capa más externa es la cáscara, que actúa como protectora del grano. La misma es removida durante el proceso de elaboración del arroz, obteniendo el arroz cargo o integral. La capa de salvado puede ser removida en un proceso llamado pulido, obteniéndose así el arroz blanco.

Al cosechar el arroz, este tiene un contenido de humedad muy elevado, entre 17% y 25% (en base húmeda, dependiendo del momento de la zafra), haciéndolo susceptible al crecimiento de hongos que deterioran el producto y afectan su calidad. Por este motivo el arroz debe ser secado a una humedad aproximada de 13% (base húmeda), para disminuir la incidencia del deterioro durante el almacenamiento (Sánchez, Gómez-Guerrero and Billiris, 2019).

Durante el secado se transfiere calor del aire al grano, favoreciendo la evaporación de las moléculas de agua en la superficie y por lo tanto la transferencia de masa del grano al aire. Esto genera un gradiente de humedad entre la superficie y el centro, lo que produce tensiones internas dentro del grano (Jia, Sun and Cao, 2000). Estas tensiones pueden ocasionar fisuras e incluso llegar a fracturar el grano, disminuyendo el rendimiento general del proceso y la calidad del arroz (Chayjan, Ghasemi and Sadeghi, 2019).

La magnitud del gradiente generado depende de parámetros del proceso (como humedad relativa, temperatura y velocidad del aire de secado) y del contenido de humedad del grano (Buggenhout et al, 2013). Las dimensiones del grano también impactan en la magnitud del gradiente, ya que determinan el área de la superficie que intercambia con el aire y la distancia que recorre el agua dentro del grano.

Comprender la relación entre los principales parámetros que inciden en el proceso de secado y la formación del gradiente de humedad es de gran importancia para poder disminuir el porcentaje de granos quebrados durante el proceso de secado. De esta manera puede obtenerse un modelo que permita, una vez conocidas las propiedades del arroz, modificar las variables del aire de secado de forma de minimizar el porcentaje de granos quebrados.

El objetivo de este trabajo es construir un modelo de secado de un grano de arroz utilizando el método de elementos finitos (MEF) y comprender cómo inciden en el proceso de secado y el gradiente de humedad las principales propiedades fisicoquímicas del arroz, las dimensiones del grano y las propiedades del aire de secado.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Modelado del arroz

El arroz cosechado posee tres grandes zonas: la cáscara, el salvado y el endospermo. La cáscara representa aproximadamente el 20% en peso (Juliano y Tũaño, 2018) del grano de arroz y es una capa superficial que protege su interior. El grano descascarado está compuesto por el endospermo y una capa de salvado que lo recubre. Esta capa usualmente se quita durante el molinado/pulido, representando aproximadamente un 10% en peso (Juliano y Tũaño, 2018)

tomando como base el arroz cargo o integral (arroz descascarado). Una vez pulido se obtiene el grano de arroz blanco, el cual se comercializa.

Para el modelado se realizaron distintas configuraciones que permitan evaluar cómo varía el gradiente de humedad modificando tanto el número de capas del arroz, como las dimensiones. Por un lado, se evaluaron distintas configuraciones de grano de arroz, modificando las dimensiones de ancho y modificando la composición de capas del grano, suponiéndolo como un cuerpo de una sola capa (solo endospermo), de dos capas (cáscara y endospermo) y de tres capas (cáscara, salvado y endospermo). Los granos de arroz no tienen una forma regular. Comúnmente se los caracteriza mediante tres variables: largo, ancho y espesor. Para el modelado, se simplificó la geometría de los granos de arroz asumiendo que pueden aproximarse a elipsoides (Prakash et al., 2011).

2.2 Modelado del secado

El secado del arroz es un proceso que involucra la transferencia de calor y masa. Si bien es un proceso que ha sido estudiado en profundidad, aún no existe certeza en si el proceso de difusión se da en forma de líquido hasta la superficie o se evapora dentro del grano de arroz (Prakash et al., 2011). Ambas posibilidades han demostrado buenos resultados (Haghighi & Segerlind, 1991; Yang et al., 2002) En este trabajo se usó la suposición de que la difusión se da en estado líquido. Para realizar el modelado del proceso se toman por válidas las siguientes suposiciones:

1. El mecanismo de movimiento de humedad en el grano de arroz es el de difusión líquida
2. El coeficiente de difusión de agua no depende del contenido de humedad (Steffe & Singh, 1982)
3. Se supone a las componentes del grano de arroz como elipsoides (núcleo, salvado y cáscara).
4. Los componentes se suponen isotrópicos.
5. La reducción volumétrica del grano durante el secado es despreciable.
6. La transferencia de calor por radiación es despreciable debido a que las temperaturas son muy bajas para influir significativamente en el proceso.

Considerando lo antes mencionado, las ecuaciones que gobiernan el proceso corresponden a la ley de difusión de Fick y la Ley de Fourier.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (1)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (2)$$

Donde M es el contenido de humedad en base seca (kg agua/kg materia seca), t es la variable tiempo (s), D es la difusividad del agua en el arroz (m^2/s), ρ es la densidad del arroz (kg/m^3), C_p es el calor específico ($J/(kgK)$), k es la conductividad térmica (W/mK) y Q es el calor volumétrico generado (W/m^3), que para este caso es cero al no tener generación de calor y tomar como suposición que la difusión se da en forma de agua líquida y que la evaporación únicamente se da en la superficie del grano.

Las condiciones iniciales y de borde del problema son las siguientes:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{t>0, \text{superficie}} = h_t (T_s - T_a) - \frac{\rho h_{fg} V}{A} \frac{\partial M_{av}}{\partial t} \quad (3)$$

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (4)$$

$$D \frac{\partial M}{\partial n} \Big|_{t>0, \text{superficie}} = h_m (M_s - M_e) \quad (5)$$

$$M|_{t=0} = M_i \quad (6)$$

Donde h_t (W/m²K) es el coeficiente de transferencia de calor por convección, h_m (m/s) es el coeficiente de transferencia de masa por convección, T_s (°C) es la temperatura de la superficie del grano de arroz, T_a (°C) es la temperatura del aire de secado, T_0 (°C) es la temperatura de la superficie del grano de arroz en el tiempo cero, h_{fg} (J/kg) es el calor latente de vaporización del agua, V (m³) es el volumen del grano de arroz, A (m²) es el área de la superficie del grano de arroz, M_{av} (kg agua/kg de arroz en base seca, bs) es la humedad promedio del grano de arroz en cualquier tiempo dado en base seca, M_s (kg agua/kg de arroz bs) es la humedad de la superficie del grano de arroz a cualquier tiempo dado en base seca, M_e (kg agua/kg de arroz en base seca) es la humedad de equilibrio del grano de arroz a las condiciones del ambiente a cualquier tiempo dado en base seca, M_i (kg agua/kg de arroz en base seca) es la humedad inicial.

Las ecuaciones (3) y (4) representan la condición de borde y condición inicial respectivamente para la ecuación de transferencia de calor, y las ecuaciones (5) y (6) definen la condición de borde e inicial para la ecuación de difusión. La humedad de equilibrio (M_e) se define cómo la humedad que alcanzaría un grano de arroz en un proceso de secado a una determinada temperatura y humedad relativa de aire y a un tiempo tendiente a infinito.

La Tabla 1 resume las propiedades utilizadas para la construcción del modelo.

Parámetro (unidades)	Valor / formula	Referencia
C_p (J/(kgK))	Endospermo: $1180+3766 \times M$ Salvado: $0,125/[1/(1201+3807 \times M)-0,875/C_{pEndospermo}]$ Cascara: $0,2/[1/(1109+4477 \times M)-0,1/C_{pSalvado}-0,7/C_{pEndospermo}]$	(Laguee and Jenkins, 1991)
D (m ² /s)	$c_1 \times \exp[-c_2/(T+273)]$ Para cascara: $c_1=4,84 \times 10^2$; $c_2=7380,8$ Para salvado: $c_1=7,97 \times 10^{-1}$; $c_2=5110$ Para endospermo: $c_1=2,57 \times 10^{-3}$; $c_2=2880$	(Steffe and Singh, 1980)
h_m (m/s)	$0,01959+0,08073 \times u^{0.553}$ u es la velocidad del aire de secado en m/s	(Laguee and Jenkins, 1991)
h_t (W/(m ² K))	$16,09+65,87 \times u^{0.53}$	(Laguee and Jenkins, 1991)
h_{fg} (J/kg)	$1000+(1+2,07 \times e^{-21,74 \times M}) \times (2502-2,39 \times T_a)$	(Laguee and Jenkins, 1991)
k (W/(mK))	$(0,0637+0,0958 \times M)/(0,656-0,475 \times M)$	(Laguee and Jenkins, 1991)
M_e (kg agua/kg de arroz bs)	$0,29394-0,046015 \times \ln[-(T+35,703) \times \ln(RH)]$	(Laguee and Jenkins, 1991)
ρ (kg/m ³)	$c_0 \times (1456+705 \times M)$ Para cascara: $c_0=0,532$ Para salvado: $c_0=1,493$ Para endospermo: $c_0=1,257$	(Laguee and Jenkins, 1991)

Tabla 1: Propiedades y parámetros utilizados para el modelo.

2.3 Construcción del modelo en elementos finitos

Para resolver el modelo teórico descrito previamente se modeló el problema en COMSOL Multiphysics® (COMSOL) utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF). Se siguió el procedimiento presentado por Yang et al. (2002) para validar en una primera instancia el modelo construido, al comparar con los resultados obtenidos.

La geometría del grano de arroz se construyó como tres elipsoides con simetría de revolución en dos ejes, correspondiendo cada elipsoide a cada capa que conforma el arroz. Las dimensiones utilizadas corresponden a las del modelo de Yang et al. (2002). El problema fue resuelto como un modelo plano axisimétrico tomando un cuarto de elipse, de manera de reducir los cálculos del proceso. Se utilizó una malla no estructurada de 5510 elementos de dominio, con un tamaño máximo de elemento de $4.3 \times 10^{-5} \text{m}$ y un tamaño mínimo de $8.6 \times 10^{-8} \text{m}$. La Figura 1 representa el cuerpo construido con pocos elementos en comparación con los que se usaron efectivamente en el modelo de elementos finitos, sólo para visualización.

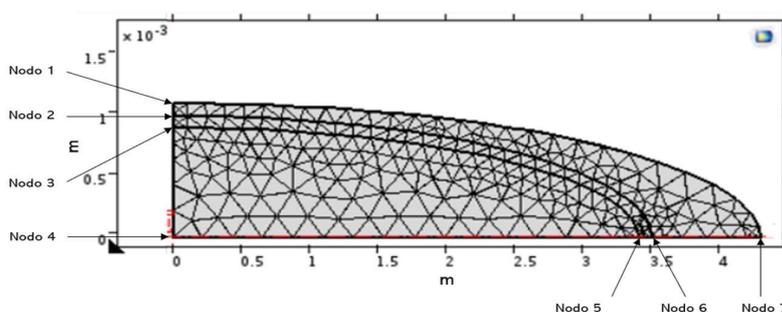


Figura 1: Malla de MEF de una cuarta parte de arroz largo representado en una geometría axisimétrica.

En el modelo se determinaron siete puntos de evaluación para obtener los valores de temperatura y humedad específica. La Tabla 2 indica los nodos de evaluación.

Nodo	Descripción
1	Capa exterior cascara, eje ancho
2	Capa exterior salvado, eje ancho
3	Capa exterior endospermo, eje ancho
4	Centro del endospermo
5	Capa exterior endospermo, eje largo
6	Capa exterior salvado, eje largo
7	Capa exterior cascara, eje largo

Tabla 2: Nodos de evaluación.

2.4 Procedimiento

Para comprender cómo las distintas variables del arroz inciden en el proceso de secado, se realizaron varios modelados variando las propiedades del aire de secado, las propiedades del arroz, las dimensiones y la composición de capas. Se calculó el gradiente de humedad generado, principalmente entre los nodos 2 y 4, donde se genera el mayor gradiente de humedad que da lugar a la fractura de los granos.

2.5 Validación del modelo

Para validar el modelo se realizó una simulación replicando las condiciones utilizadas por

Yang et al. (2002). Los resultados se muestran en la Figura 2. En la figura se visualiza el contenido de humedad de un grano de arroz durante el proceso de secado, luego de quince minutos de proceso (izquierda) y luego sesenta minutos (derecha). Se compararon los resultados obtenidos en ambos tiempos con los del estudio mencionado siendo coincidentes tanto en el contenido de humedad de las distintas capas, como en la evolución del secado en función del tiempo.

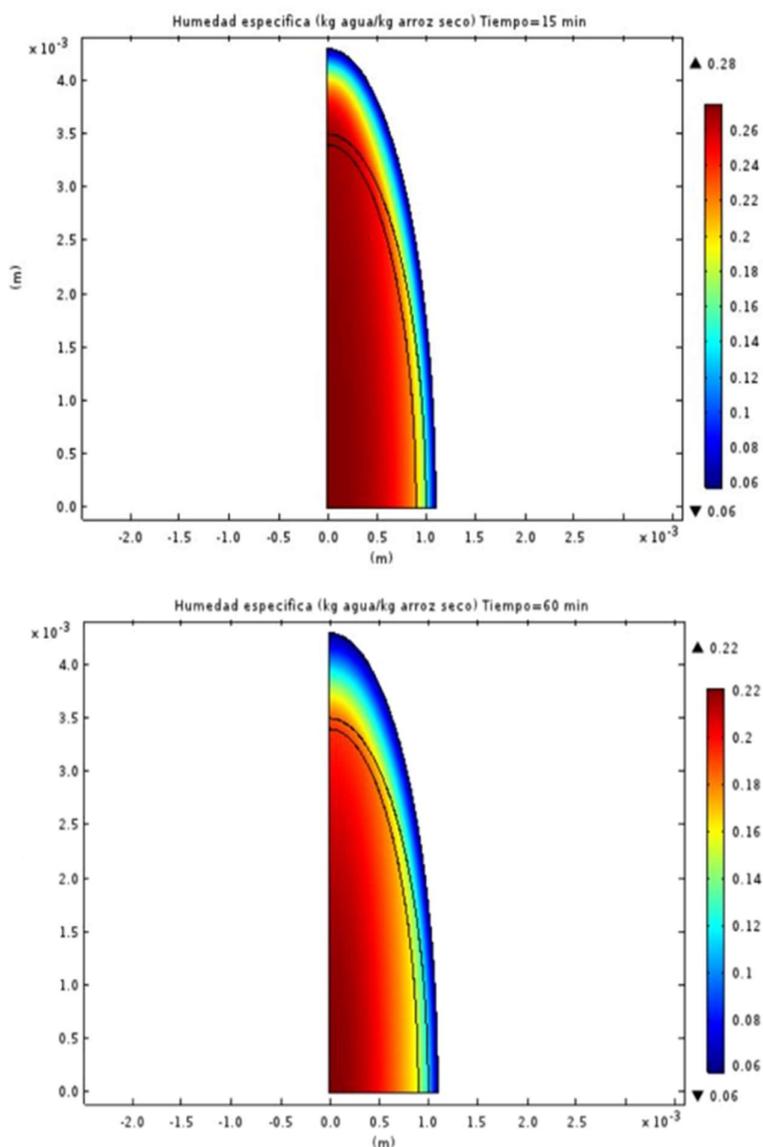


Figura 2: Gráficos de humedad específica del arroz en base seca replicando condiciones del estudio de Yang et al. (2002). Superior: resultado del modelo evaluado a los 15 minutos. Inferior: resultado del modelo evaluado a los 60 minutos. Condiciones de ensayo $T_i=20^{\circ}\text{C}$, $T_a=60^{\circ}\text{C}$, $\text{HR}=17\%$, $M_i=28\%\text{b.s.}$

Para identificar el comportamiento de los gradientes de humedad en el tiempo, dentro del grano, en la Figura 3 se presenta la evolución de la humedad para tres nodos de referencia (nodos 2, 4, y 6). Los resultados se comparan con los valores presentados por Yang et al. (2002) y presentan una buena concordancia entre ellos.

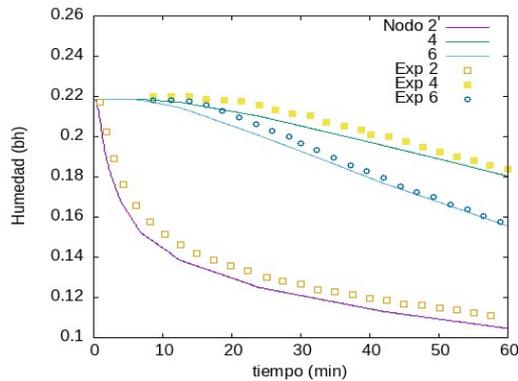


Figura 3: Humedad en base húmeda de los nodos 2, 4, y 6. Condiciones de ensayo $T_i=20^\circ\text{C}$, $T_a=60^\circ\text{C}$, $HR=17\%$, $M_i=22,1\%$ bh (28,3% bs).

A su vez, de la figura anterior se puede notar que los mayores gradientes de humedad se dan entre el nodo 2 y 4, en el ancho del arroz. Por esta razón en este trabajo todos los ensayos se centrarán en estudiar los gradientes de humedad generados entre los nodos 2 y 4.

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Sensibilidad a la temperatura y humedad relativa

Debido a que el arroz se equilibra con la temperatura del aire en un período muy corto de tiempo, un abordaje posible es despreciar el aporte de la ecuación de transferencia de calor (Steffe y Singh, 1980; Nosrati et al., 2020). En el modelo utilizado en este trabajo no fue despreciada la ecuación de transferencia de calor. En la Figura 4 se estudió el gradiente de temperatura que se desarrolla en el grano de arroz entre sus puntos extremos, donde se puede apreciar que en menos de dos minutos de transcurrido el proceso, el grano se estabiliza a una temperatura muy cercana a la del aire.

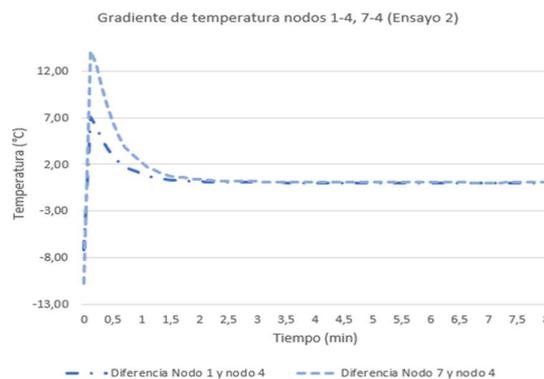


Figura 4: Gradiente de temperatura nodos 1-4 y 7-4. Condiciones de ensayo $T_i=20^\circ\text{C}$, $T_a=45^\circ\text{C}$, $HR=17\%$, $M_i=28\%$ b.s.

Teniendo esto presente, las primeras pruebas se realizaron para analizar la incidencia de la temperatura y humedad relativa del aire de secado en el gradiente de humedad dentro del grano entre los nodos 2 y 4. La Tabla 3 resume las condiciones de realización de las distintas pruebas.

Prueba	Humedad inicial (bs)	Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa (%)
1	0.28	60	17
2	0.28	45	17
3	0.28	30	17
4	0.28	45	32
5	0.28	45	47

Tabla 3: Condiciones de ensayos donde se modificó la humedad relativa y temperatura de aire de secado. Temperatura y humedad inicial del grano constantes ($T_i=20^\circ\text{C}$, $M_i=28\%$ bs).

A partir de estos ensayos se obtuvieron las gráficas de la Figura 5, donde se visualiza el gradiente de humedad entre los nodos 2 y 4 para distintas temperaturas de aire de secado (Izquierda) y distinta humedad relativa de aire de secado (Derecha).

Cómo se visualiza en los gráficos, el gradiente de humedad aumenta en magnitud a medida que aumenta la temperatura y en la medida que disminuye la humedad relativa del aire de secado. Esto se debe a la dependencia de la humedad de equilibrio del arroz con estas variables y a la dependencia de la difusividad con la temperatura. En la Figura 6 se puede ver la dependencia de estas propiedades con las variables mencionadas.

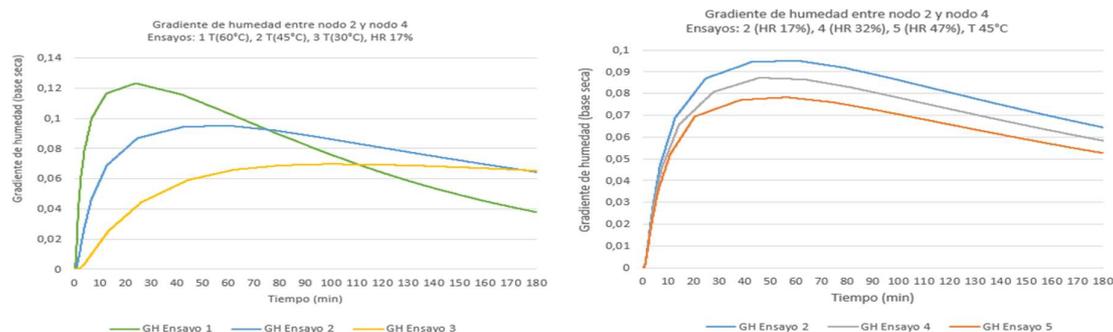


Figura 5: Izquierda: efecto de la temperatura de del aire de secado en el gradiente de humedad entre nodos 2- 4. Derecha: efecto de la humedad relativa del aire de secado en el gradiente de humedad entre nodos 2- 4

En la Figura 5 Izquierda, se puede ver una dependencia fuerte del gradiente de humedad con la temperatura del aire de secado, alcanzando un máximo en el ensayo 1 de 12,3% bs y en el ensayo 3 un máximo cercano a 7% bs para temperaturas de 60°C y 30°C respectivamente. En el caso de la humedad relativa (Figura 5 Derecha) estas variaciones son significativamente menores. En el ensayo 2, se alcanza un máximo de gradiente de 9,5% bs y en el ensayo 5 se obtiene un máximo de 7,8% bs.

Esta diferencia se debe a la incidencia del coeficiente de difusividad, si bien cómo se visualiza en la Figura 6 Izquierda, la variación de la humedad de equilibrio es más sensible a las variaciones de la humedad relativa, el aumento de la difusividad en función de la temperatura aumenta en mayor medida la transferencia de masa de agua al aire y el flujo dentro del grano, por lo que el gradiente que se genera es mayor.

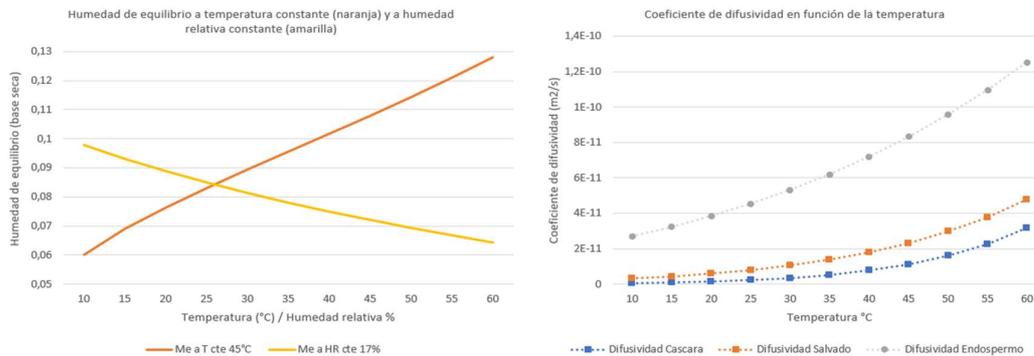


Figura 6: Izquierda: Humedad de equilibrio -en función de la temperatura a humedad relativa constante (amarillo)- y -en función de la humedad relativa a temperatura constante (anaranjado). Derecha: difusividad en función de la temperatura para el endospermo, la cascara y el salvado del arroz. Se toman ecuaciones presentadas en la Tabla 1.

3.2 Sensibilidad en las propiedades y geometría del arroz

En los ensayos 4, 6 y 7 se modificó la humedad inicial del arroz para visualizar la incidencia de este parámetro en el gradiente de humedad. Se realizaron ensayos con contenidos de humedad de 23,5%, 28% y 31,6% en base seca, y manteniendo la temperatura de aire de secado de 45°C, la humedad relativa 32% y la temperatura inicial en 20°C. En la Figura 7 Izquierda se pueden observar los resultados obtenidos. Como era de esperarse, el gradiente de humedad aumenta conforme aumenta el contenido de humedad. Para el ensayo realizado con un contenido de humedad de 31,6% se obtuvo un gradiente de humedad máximo de 10,2%, para el ensayo cuyo contenido de humedad era de 28% el gradiente máximo fue de 8,7% y para el caso donde la humedad correspondiente era de 23,5% el gradiente alcanzó un valor de 6,6%.

En los ensayos 8 y 9 se modificó el ancho del arroz en relación con el ensayo 4, manteniendo el resto de las variables constantes. En el ensayo 8 se aumentó el ancho en un 10% y para el ensayo 9 el aumento fue del 20%, el resto de las propiedades se mantuvieron constantes. En la Figura 7 (derecha) se grafican los resultados obtenidos para esta configuración.

Los cambios en los gradientes de humedad debido a la modificación del ancho son muy pequeños. Los valores de gradiente máximo que se alcanzaron en las distintas configuraciones estuvieron entre 8,72% y 8,80%. Se varió únicamente el ancho debido a que es el sentido donde se desarrolla el mayor gradiente de humedad y se apuntó a abarcar relaciones de ancho sobre largo mayores a 3, que es como comúnmente se determina si los granos son catalogados como largos.

En los ensayos 12 y 13 se modificó el valor de la difusividad del salvado y del endospermo, aumentando un 10% para ambas capas en el ensayo 12 y disminuyendo un 10% en el ensayo 13. La variación de la difusividad en estas capas del arroz no generó grandes variaciones en el gradiente de humedad, dado que la cascara funciona como una barrera al movimiento del agua dentro del grano. En la Figura 8 (izquierda) se puede ver cómo el gradiente de humedad aumenta conforme disminuye la difusividad del endospermo y salvado. Esto quiere decir que dentro de esas capas hay una mayor fluidez del agua y se alcanzan distribuciones más uniformes cuando la difusividad es más alta.

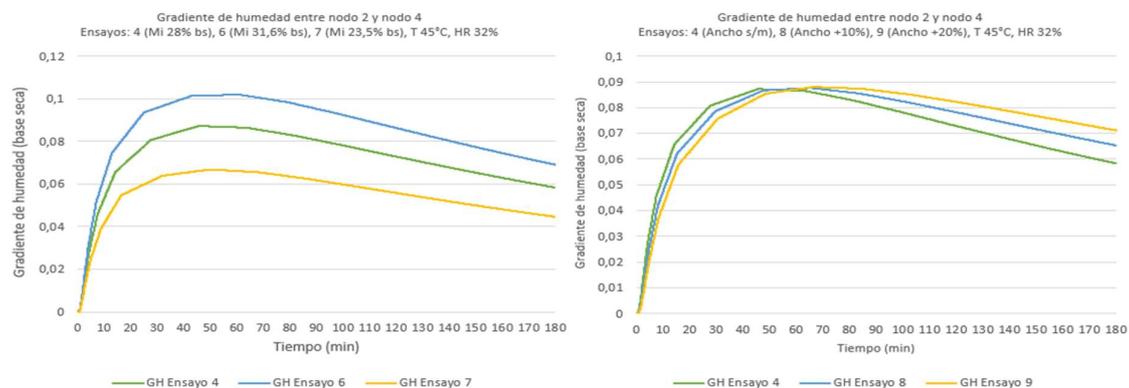


Figura 7: Izquierda: Efecto de la humedad inicial del arroz en el gradiente de humedad entre nodos 2- 4. Condiciones de ensayo $T_i=20^{\circ}\text{C}$, $T_a=45^{\circ}\text{C}$, $HR=32\%$. Derecha: Efecto del ancho del arroz en el gradiente de humedad entre nodos 2- 4. Condiciones de ensayo $T_i=20^{\circ}\text{C}$, $T_a=45^{\circ}\text{C}$, $HR=32\%$.

La Figura 8 Derecha, presenta el último ensayo realizado, donde se modificó la estructura del arroz, modelándolo como un elemento de dos capas, ensayo 14 (cáscara y endospermo), y como un elemento único con el ensayo 15 (endospermo). En estas pruebas se analiza el posible grado de error al modelar simplificando su estructura.

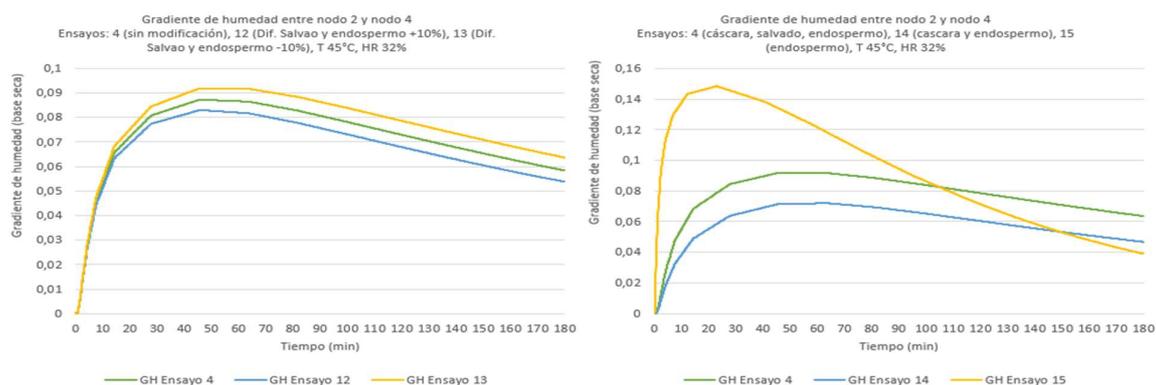


Figura 8: Izquierda: Efecto del coeficiente de difusividad del salvado y endospermo en gradiente de humedad entre nodos 2- 4. Condiciones de ensayo $T_i=20^{\circ}\text{C}$, $T_a=45^{\circ}\text{C}$, $HR=32\%$. Derecha: Efecto del grado de precisión en la definición de la estructura del grano de arroz en el gradiente de humedad entre nodos 2- 4. Condiciones de ensayo $T_i=20^{\circ}\text{C}$, $T_a=45^{\circ}\text{C}$, $HR=32\%$.

La suposición del arroz como un elemento único con las propiedades del endospermo generan un gradiente de humedad muy elevado, que se debe al alto valor de la difusividad que toma todo el grano de arroz, facilitando el movimiento del agua en el grano. En este caso queda claro que no sería correcto modelar el secado del grano de arroz con cáscara utilizando las propiedades del endospermo. En modelos donde se supone el grano como una única capa el coeficiente de difusividad global tiene un valor cercano al del salvado (Lu and Siebenmorgen, 1992). Para la prueba donde se considera el grano de arroz como un elemento de dos capas, cáscara y endospermo, el gradiente de humedad entre los nodos 2 y 4 disminuye. La razón es la misma que las pruebas donde se modificó la difusividad, pero en este caso la difusividad del salvado tomó un valor muy superior, por lo que la modificación del gradiente es sensiblemente mayor.

4 CONCLUSIONES

Se construyó un modelo para el secado de arroz utilizando COMSOL, que describe el proceso de secado adecuadamente. Este modelo permite modificar tanto la estructura como las propiedades del arroz y las propiedades del aire de secado, siendo importante para futuros trabajos y análisis. De los ensayos realizados se puede evidenciar que uno de los parámetros a los que se le debe prestar mayor atención es la temperatura del aire de secado, debido a que modifica tanto la humedad de equilibrio como el coeficiente de difusividad. Esto aumenta significativamente la transferencia de masa del arroz al aire, generando mayores gradientes a mayores temperaturas. Esto es importante para diseñar curvas de secado que eviten alcanzar gradientes de humedad elevados, disminuyendo las tensiones dentro del grano y la formación de fisuras que llevan a que se quiebre, perdiendo valor comercial. Por otra parte, el error que se obtiene por simplificar la estructura del grano es considerable si se quiere poner énfasis en el gradiente de humedad, por lo que es importante modelar el grano en su estructura más compleja de tres capas (endospermo, salvado y cáscara).

REFERENCIAS

- Buggenhout, J., Brijs, K., Celus, I., Delcour, J.A. (2013). The breakage susceptibility of raw and parboiled rice: A review. *Journal of Food Engineering*, 117, 304-315.
- Chayjan, R. A., Ghasemi, A. and Sadeghi, M. (2019) 'Stress fissuring and process duration during rough rice convective drying affected by continuous and stepwise changes in air temperature', *Drying Technology*, 37(2), pp. 198–207. doi: 10.1080/07373937.2018.1445637.
- COMSOL Multiphysics® v. 6.1. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- Jia, C. C., Sun, D. W. and Cao, C. W. (2000) 'Mathematical simulation of stresses within a corn kernel during drying', *Drying Technology*, 18(4–5), pp. 887–906. doi: 10.1080/07373930008917743.
- Sánchez, A., Gómez-Guerrero, B. and Billiris, A. (2019) 'Almacenamiento de arroz: influencia en la inocuidad del grano', *Innotec*, 19(19), pp. 109–124. doi: 10.26461/19.08.
- Uruguay XXI (2022) Sector Agrícola en Uruguay. Available at: <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/20c2018b1a2e68514020b55bcd11b62c6874640e.pdf#:~:text=En 2021 el PIB de,forestación con 0%2C6%25>.
- Haghighi, K., & Segerlind, L. J. (1991). Modeling Simultaneous Heat and Mass Transfer in an Isotropic Sphere- A Finite Element Approach. *Transactions of the ASAE*, 31(2), 629–0637. <https://doi.org/10.13031/2013.30758>
- Juliano, B.O. and Tũaño, A.P.P. (2018) 'Gross structure and composition of the rice grain', *Rice: Chemistry and Technology*, pp. 31–53. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811508-4.00002-2>.
- Laguee, C. and Jenkins, B.M. (1991) 'MODELING PRE-HARVEST STRESS-CRACKING OF RICE KERNELS PART II: IMPLEMENTATION AND USE OF THE MODEL', *Transactions of the ASAE*, 34(4), pp. 1812–1823. Available at: <https://doi.org/10.13031/2013.31804>.
- Lu, R. and Siebenmorgen, T.J. (1992) 'Moisture Diffusivity of Long-grain Rice Components', *Transactions of the ASAE*, 35(6), pp. 1955–1961. Available at: <https://doi.org/10.13031/2013.28822>.
- Nosrati, M. et al. (2020) 'New approach in determination of moisture diffusivity for rough rice components in combined far-infrared drying by finite element method', *Drying Technology*, 38(13), pp. 1721–1732. Available at: <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1658203>.
- Prakash, B., Pan, Z., Prakash, B., & Pan, Z. (2011). Modeling Moisture Movement in Rice. *Advanced Topics in Mass Transfer*. <https://doi.org/10.5772/15317>
- Steffe, J.F. and Singh, R.R. (1980) 'Liquid Diffusivity of Rough Rice Components', *Transactions of the ASAE*, 23(3), pp. 767–0774. Available at: <https://doi.org/10.13031/2013.34660>.
- Steffe, J. F., & Singh, R. P. (1982). Diffusion coefficients for predicting rice drying behaviour. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 27(6), 489–493. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(82\)90087-7](https://doi.org/10.1016/0021-8634(82)90087-7)
- Yang, W. et al. (2002) 'INTRA-KERNEL MOISTURE RESPONSES OF RICE TO DRYING AND TEMPERING TREATMENTS BY FINITE ELEMENT SIMULATION', *Transactions of the ASAE*, 45(4), pp. 1038-. Available at: <https://doi.org/10.13031/2013.9917>