

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESTUDIO DE LAS ETAPAS DE SECADO Y COCCIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE ARROZ TIPO “SEÑIA” DE RÁPIDA COCCIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA E
INGENIERÍA DE LOS ALIMENTOS

ALUMNA: Joselyn Santamaría González

TUTOR/A ACADÉMICO: María Dolores Ortolá Ortolá

COTUTOR/A: Marisa Castelló Gómez

DIRECTOR EXPERIMENTAL: Ruth de los Reyes Cánovas

Curso Académico: 2017-2018

VALENCIA, diciembre de 2017

ESTUDIO DE LAS ETAPAS DE SECADO Y COCCIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE ARROZ TIPO “SEÑIA” DE RÁPIDA COCCIÓN

Joselyn Santamaría González, María Dolores Ortolá Ortolá, Marisa Castelló Gómez

Instituto de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo
Universitat Politècnica de València

RESUMEN

Diversos estudios han establecido el remojo, la precocción y el secado de arroz como pretratamientos comunes en la obtención de una amplia gama de productos de rápida cocción. El secado como operación unitaria es uno de los pasos críticos en la obtención de este tipo de producto. Los métodos y condiciones de secado juegan un papel importante para lograr la calidad deseada. En este trabajo se ha evaluado el secado por aire caliente a diferentes temperaturas (40, 60 y 80°C) de arroz tipo Senia precocido (blanco e integral) como parte del proceso de obtención de arroz de rápida cocción. La pérdida de humedad del producto durante el secado se modelizó mediante tres modelos ampliamente utilizados en productos agrícolas, el modelo difusional de Fick, y los modelos de Page y Midili. En los dos primeros se observó una desviación de los datos experimentales frente a los predichos a tiempos largos de secado, mientras que el modelo de Midili parece ajustarse en todo el periodo de tiempo considerado. Con los tres modelos, se observó una dependencia de la temperatura del aire con la velocidad de secado, aumentando ésta al aumentar la temperatura.

Además, se evaluó la influencia de la temperatura de secado sobre la fase final de cocción del arroz, estudiándose la capacidad de absorción de agua y el tiempo necesario de cocción mediante análisis de sus propiedades mecánicas. En general, el arroz blanco presenta mayor capacidad de absorción de agua que el integral, alcanzando su punto de cocción a los 5 minutos frente a los más de 9 minutos del integral. Al final de la cocción no se observaron diferencias significativas en los parámetros mecánicos evaluados por efecto de la temperatura de secado, por lo que se recomendaría un secado a 40°C para reducir el gasto energético. Para los dos tipos de arroz se consiguen reducciones del tiempo de cocción entre el 60 y el 75% con respecto al arroz tradicional tipo Senia.

PALABRAS CLAVES: arroz, cinética de secado, tiempo cocción, cocción rápida

RESUM

Diversos estudis han establert el remull, la precocció i l'assecat d'arròs com pretractaments comuns en l'obtenció d'una àmplia gamma de productes de ràpida cocció. L'assecat com a operació unitària, és un dels passos crítics en la preparació d'arrossos de ràpida cocció. Els mètodes i condicions d'assecat juguen un paper important per a aconseguir la qualitat desitjada. En este treball s'ha avaluat l'assecat per aire calent a diferents temperatures (40, 60 i 80°C) d'arròs tipus Sènia precuit (blanc e integral) com a part del procés d'obtenció d'arròs de ràpida cocció. La pèrdua d'humitat del producte durant

l'assecat es va modelitzar amb tres models àmpliament utilitzats en productes agrícoles, el model difusional de Fick i els models de Page i Midili. En els dos primers es va observar una desviació de les dades experimentals enfront de les predites a temps llargs d'assecat, mentre que el model de Midili pareix ajustar-se en tot el període de temps considerat. En tots els casos es va observar una dependència de la temperatura de l'aire amb la velocitat d'assecat, augmentant ésta a l'augmentar la temperatura.

A més, es va avaluar la influència de la temperatura d'assecat sobre la fase final de cocció de l'arròs, estudiant-se la capacitat d'absorció d'aigua i el temps necessari de cocció per mitjà d'anàlisi de les seues propietats mecàniques. En general, l'arròs blanc presenta major capacitat d'absorció d'aigua que l'integral, aconseguint el seu punt de cocció als 5 minuts enfront dels més de 9 minuts de l'integral. Al final de la cocció no es van observar diferències significatives en els paràmetres mecànics avaluats per efecte de la temperatura d'assecat, per la qual cosa es recomanaria un assecat a 40°C per a reduir el gasto energètic. Per als dos tipus d'arròs s'aconsegueixen reduccions del temps de cocció entre el 60 i el 75% respecte a l'arròs tradicional tipus Sénia.

PARAULES CLAU: arròs, cinètica d'assecat, temps cocció, cocció ràpida

ABSTRACT

Several studies have established the soaking, precooking and drying of rice as common pretreatments to obtain a wide range of fast cooking products. Drying as a unit operation is one of the critical steps obtaining this type of product. The drying method and conditions play an important role in achieving the desired quality. In this study, the drying by hot air of pre-cooked Senia rice at different temperatures (40°, 60°, 80°C) has been evaluated as part of the process to obtain fast-cooking rice. The moisture loss of the product during drying was modeled by three models widely used in agricultural products, the Fick diffusional model, and the Page and Midili models. In the first two, a deviation of the experimental data was observed compared to those predicted for long drying times, while the Midili model seems to fit throughout the period of time considered. With those three models, a dependence of the air temperature with the drying speed was observed, increasing it with higher temperature.

In addition, the influence of the drying temperature on the final cooking phase was evaluated, studying the water absorption capacity and the necessary cooking time by analyzing its mechanical properties. In general, white rice has a greater water absorption capacity than integral rice, reaching its cooking point at 5 minutes compared to more than 9 minutes of the integral. At the end of the cooking, no significant differences were observed in the mechanical parameters evaluated by the effect of the drying temperature, so it would be recommended to dry at 40°C to reduce energy expenditure. For both types of rice, reductions in cooking time were achieved between 60 and 75% respecting to traditional Senia type rice.

KEYWORDS: rice, drying kinetics, cooking time, quick cooking

1. INTRODUCCIÓN

El arroz es uno de los cereales de mayor importancia a nivel mundial, aportando fundamentalmente hidratos de carbono básicos a la alimentación de la población en amplias zonas del mundo. Es un grano de gran valor para salvaguardar la seguridad alimentaria en cada vez mayor número de países de escasos ingresos. Se prevé que la producción mundial de arroz en el 2017/2018 se incremente en un 1,1 por ciento llegando a 503,2 millones de toneladas. De esta cantidad, se prevé que la cantidad destinada a consumo humano sea de 406,6 millones de toneladas, un 1,4 por ciento más que en el 2016/2017 (FAO, 2017).

España es el segundo país productor de arroz de la Unión Europea, y el 14% de su producción corresponde a arroz de la Denominación de Origen Protegida (D.O.P) Arroz de Valencia. El sector arrocerero en el Parque Natural de la Albufera, en Valencia, constituye el pilar básico de la economía local, con una producción anual media de 115000 toneladas de arroz cáscara y una superficie de 14500 ha de cultivo (Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural, 2017).

Las variedades de arroz tipo senia, bomba y albufera están adaptadas perfectamente a la zona del Parque Natural de la Albufera, donde el cultivo supera los 1200 años de antigüedad (Consejo Regulador Denominación de Origen Arroz de Valencia, 2017). Bajo el nombre “tipo Senia” en la D.O.P Arroz de Valencia, se engloba una serie de variedades que han sido obtenidas de las parentales Senia y Bahía. Estos granos brindan una alta capacidad de retención de agua, y una vez cocidos, resultan en una textura cremosa, jugosa y consistente. Por ello son un claro referente de la gastronomía española.

Los nuevos hábitos de consumo exigen productos de conveniencia y tiempos cortos de cocción. Sin embargo, el mercado de arroces precocidos ha tardado más en desarrollarse que en otros productos, puesto que el arroz al cocinarse adquiere unas propiedades difíciles de conservar (Infoalimentación, 2017). No obstante, el empleo de nuevas formas de conservación y su adaptación al mundo del arroz, ha permitido la investigación en el desarrollo de nuevos productos, tales como arroz vaporizado, arroz hervido envasado, arroz congelado o arroz de cocción rápida. En su mayoría estos productos se precocinan, se congelan o se secan y finalmente suele ser necesario completar el tratamiento culinario con tiempos cortos de cocinado (Sociedad Española de Nutrición Básica y Aplicada, 2004).

El remojo y la precocción son pretratamientos comunes para la obtención de varios productos de conveniencia, permitiendo una mejor distribución del agua dentro de los granos, lo que conlleva a una reducción de tiempo y energía al consumidor final. De igual manera, el secado es indispensable para concederle al arroz la humedad que garantice su óptima vida de anaquel.

Actualmente, el mercado de estos productos (arroz precocido seco de larga duración) se basa en variedades de arroz largo, no existiendo estudios en variedades de arroz redondo.

El objetivo de este trabajo se centra en el estudio del secado por aire caliente como tecnología de procesamiento posterior a la precocción, para

obtener un arroz tipo Senia de rápida cocción. También se evaluará las propiedades de absorción de agua y se determinará el tiempo de cocción.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La materia prima utilizada en el presente estudio fue proporcionada por la empresa Arrocerías Antonio Tomas S.L. (Sollana, Valencia). Se utilizó arroz redondo tipo Bahía-Senia, comercializado bajo la marca Santo Tomás, siendo ésta una mezcla de variedades obtenidas de las parentales Senia y Bahía como Senia, J. Sendra, Montsianei y Gleva fundamentalmente. Se emplearon para el estudio en formato de arroz blanco e integral.

Las muestras de arroz blanco e integral fueron sometidas a etapas previas de remojo y precocción con exceso de agua optimizadas en estudios previos. De acuerdo a las condiciones establecidas por Altamirano (2017), para lograr la gelatinización del almidón de arroz, las muestras de arroz blanco se sometieron a un proceso de remojo en agua a 55°C durante 20 minutos y se precocinaron a 70°C durante 6 minutos, con una proporción agua:arroz de 3:1. Para los granos de arroz integral las muestras se sometieron a remojo durante 45 minutos en agua a 60°C y se precocinaron a 75°C durante 10 minutos, con la misma proporción agua:arroz.

Determinación de la humedad

La humedad inicial de los granos del arroz precocido se determinó por el método de gravimetría AOAC (2000). Se utilizó una estufa (Selecta, España) con circulación de aire forzado. Las muestras contenidas en los crisoles fueron secadas en estufa durante 48 horas a 60°C y adicionalmente se les aplicó vacío durante 24 horas. Después de este tiempo se enfriaron en desecador hasta temperatura ambiente y se pesaron en balanza analítica Mettler Toledo, (modelo PG503-SEspaña) con $\pm 0,001$ g de precisión. El contenido en humedad de las muestras se expresó en base seca (X_w g agua/g s.s.) según la ecuación (1):

$$X_w = \frac{\text{Peso inicial muestra} - \text{Peso final muestra}}{\text{Peso final muestra}} \quad (1)$$

Secado por Aire Caliente

El secado por aire caliente de los granos de arroz blanco e integral precocidos se realizó en un secador con flujo de aire en la planta piloto del Instituto de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo (Figura 1). Este equipo consta de dos ventiladores colocados en serie que impulsan el aire a través de las resistencias donde se calienta hasta la temperatura deseada antes de entrar en la cámara de secado (0,5 x 0,25 x 0,1 m³). Las temperaturas de secado empleadas fueron 40, 60 y 80°C.

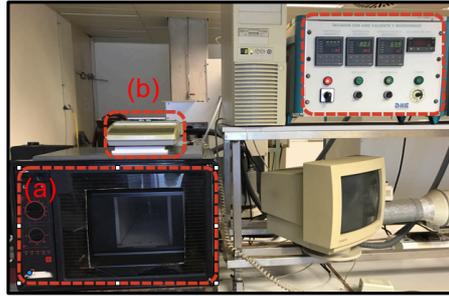


Figura 1. Secador de flujo de aire. (a) Cámara de secado y (b) balanza

Para analizar la pérdida de masa durante el secado los granos de arroz fueron pesados en tiempo real, puesto que el equipo de secado dispone de una balanza electrónica de 0,001 g de precisión (METTLER TOLEDO mod. PG503-S) de la que se suspendió una rejilla confeccionada manualmente, que contenía la materia a secar (Figura 2).



Figura 2. Disposición de la muestra en la cámara de secado

El secado por aire caliente se realizó por triplicado para las muestras de arroz blanco e integral a las tres temperaturas consideradas en el estudio. El tiempo de secado se determinó hasta que las muestras presentaron peso constante.

Modelización de la cinética de secado

La pérdida de humedad de las muestras durante el secado se ajustó a tres modelos matemáticos ampliamente utilizados en la modelización de secado de productos agrícolas (Corrêa et al., 2017). Estos modelos fueron:

- El modelo difusional de la Segunda Ley de Fick para una esfera (Ec. 2):

$$Y = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp(-D_e \cdot \pi^2 \cdot \frac{t}{r^2}) \quad (2)$$

- El modelo de Page (Ec. 3):

$$Y = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt) \quad (3)$$

- El modelo de Midili modificado (Ec. 4)

$$Y = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt) + bt \quad (4)$$

siendo X_t la humedad del producto (b.s.) a tiempo t , X_e la humedad del producto (b.s.) en el equilibrio, X_0 la humedad inicial del producto (b.s.), t el tiempo de secado (s), k la constante de secado (s^{-1}), b el coeficiente del modelo de Midili (s^{-1}), r el radio equivalente de la esfera (m) y D_e la difusividad efectiva (m^2/s).

Rehidratación de granos de arroz

Una vez secados los granos a diferentes temperaturas, éstos fueron rehidratados simulando un proceso de cocción de producto final. Para ello se prepararon por duplicado vasos de vidrio con un volumen de agua conocido y fueron puestos dentro de un baño con agua hasta que en su interior se alcanzara 100°C (Figura 3). En ese momento se introdujeron los granos de arroz con un peso conocido, manteniendo la proporción agua:arroz de 3:1. A diferentes tiempos de cocción (3, 4, 5 minutos para el arroz blanco y 3, 4, 5, 7 y 9 minutos para el arroz integral) se retiraron las muestras del baño, se eliminó el exceso de agua y se pesaron para así determinar el porcentaje de agua absorbida.



Figura 3. Muestras durante la fase de cocción

Propiedades mecánicas del arroz cocido

Para analizar la textura de los granos de arroz se llevó a cabo un ensayo de compresión TPA (Texture Profile Analysis) aplicando una fuerza de $0,98067\text{ N}$, a una velocidad de 120 mm/min , en un texturómetro (Analizador de textura TA.XT.plus, Microsystems estable, Godalming, Reino Unido), utilizando una sonda (4mm de diámetro) con base circular (Figura 4). Se realizaron 20 repeticiones para cada grupo de arroces; cada uno de ellos conformado por un tipo de arroz, una temperatura de secado y un tiempo de cocción.

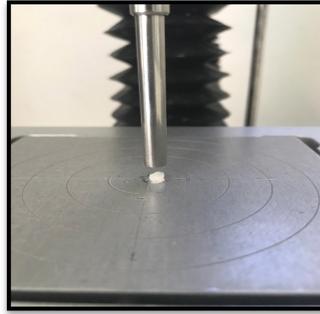


Figura 4. Detalle del ensayo de compresión del grano de arroz por una sonda de base circular

Determinación del punto final de cocción

Se realizaron pruebas visuales para medir el punto final de cocción del arroz, basadas en el método utilizado por Chakkaravarthi *et al.*, (2008) y Yu *et al.*, (2016) en muestras de arroz.

En medio de dos placas de vidrio en paralelo se presionaron granos de arroz cocidos a diferentes intervalos de tiempo. La muestra se consideró completamente cocida (Figura 5) cuando dejaba de observarse la presencia de un núcleo blanco. De esta manera se buscó determinar de forma rápida el tiempo al cual se logró la cocción del arroz.

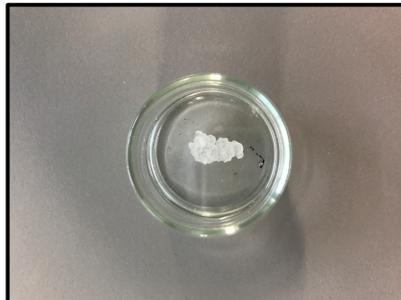


Figura 5. Análisis visual del punto final de cocción de granos de arroz

Análisis Estadístico

El tratamiento estadístico, de los resultados experimentales obtenidos se realizó con el programa Statgraphics Centurión versión XVI.I (2013). Se llevó a cabo un Análisis de la Varianza para evaluar el efecto de las variables de los modelos propuestos sobre la cinética de secado, así como el efecto de la temperatura de secado y el tiempo de cocción sobre las propiedades mecánicas del arroz blanco e integral. De igual forma se empleó este programa estadístico para realizar los ajustes de regresiones no lineales de los modelos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para modelizar la pérdida de peso de los granos durante el secado a diferentes temperaturas, y como una primera aproximación, se consideró que la velocidad de secado depende fundamentalmente de la velocidad de difusión del agua líquida o vapor a través de las muestras, por lo que se calcularon los coeficientes de difusión efectiva del agua (D_e) a partir del primer término de la solución analítica a la segunda Ley de Fick de la difusión propuesta por Cranck (1975). Dada la forma de los granos se modelizó la cinética para una geometría de una esfera (Ec. 2) a tiempos largos de proceso. Se determinó el radio equivalente (r_e) de la esfera a partir del valor medio del volumen de los granos blanco e integral ($0,29 \text{ cm}^3$). Este modelo asume que la humedad inicial de los granos se distribuye uniformemente, que las muestras son simétricas, que la salida de agua es uniforme en toda la superficie y que la difusividad permanece constante en el intervalo de humedades evaluadas. Sin embargo, la linealización de la ecuación de Fick (Figura 6) puso de manifiesto que la difusividad efectiva del agua no permanece constante con el tiempo, observándose dos tramos de pendiente diferente. Por ello, se identificó el tiempo crítico (t_c) en el cual se produce el cambio en la pendiente y se ajustó el modelo de Fick para tiempos menores de t_c . La tabla 1 muestra los valores obtenidos del coeficiente de difusión, así como el valor de t_c y el contenido en humedad (b.s.) correspondiente al punto t_c (X_c) para cada uno de los tipos de arroz evaluados y la temperatura de secado.

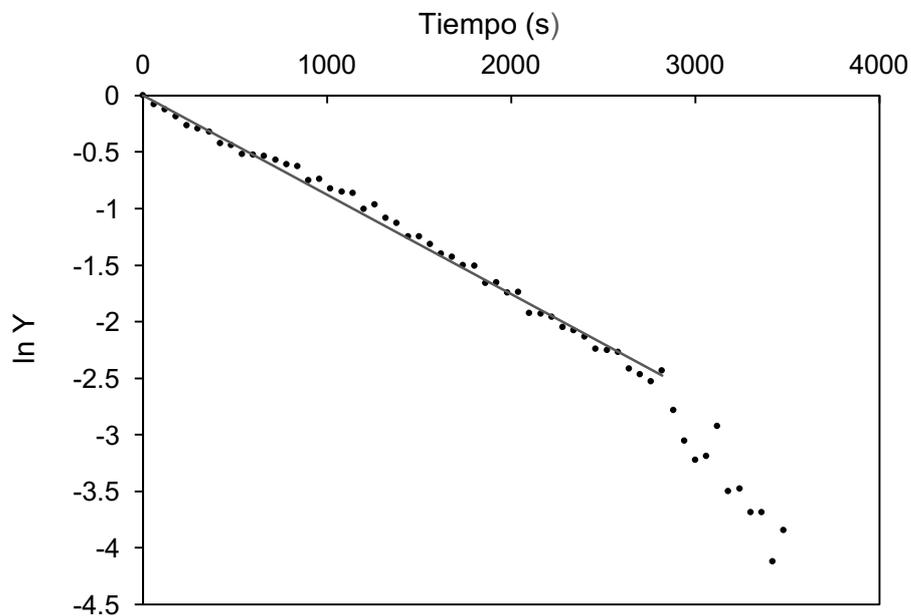


Figura 6. Linealización del modelo difusional cuando $t < t_c$ para el secado de arroz blanco a 40°C

La variación de la difusividad de agua en función del contenido en humedad de la muestra durante el secado puede atribuirse a diferentes mecanismos de transporte del agua en la muestra. A valores mayores de X_c , el mecanismo predominante es la difusión de vapor de agua del interior del grano hacia la superficie a través de la estructura porosa. Cuando el contenido en humedad es inferior a X_c , que también depende de la temperatura de secado, el agua residual está muy ligada a la estructura, disminuyendo la velocidad de secado, resultados también observados por Ndukwu (2009). Cambios similares en la difusividad efectiva en función del contenido en humedad fueron encontrados por Luangmalawat et al., (2008) en arroz largo ($X_c=0,01$).

Tabla 1. Valores medios del coeficiente de difusión efectiva (D_e) obtenidos mediante el modelo difusional de Fick para tiempos menores al tiempo crítico (t_c) y valores medios de la humedad crítica (X_c)

Tipo arroz	Temperatura de secado (°C)	$D_e \cdot 10^9$ (m ² /s)	R^2 ⁽¹⁾	X_c (b.s.)	t_c (s)
Blanco	40	1,60 ± 0,07 ^a	0,9633	0,134 ± 0,016	2820
Blanco	60	2,87 ± 0,19 ^{ab}	0,9811	0,16 ± 0,05	1374
Blanco	80	3,5 ± 0,9 ^b	0,9375	0,048 ± 0,004	1140
Integral	40	1,05 ± 0,02 ^A	0,9691	0,15 ± 0,08	3540
Integral	60	1,2245 ± 0,0002 ^B	0,9898	0,118 ± 0,08	3000
Integral	80	2,10 ± 0,02 ^C	0,9215	0,117 ± 0,08	2000

⁽¹⁾ corresponde al valor del coeficiente de determinación (R^2) más bajo.

Letras iguales indican grupos homogéneos iguales para cada tipo de arroz analizado (minúsculas: blanco y mayúsculas: integral)

Un análisis de la varianza refleja que existen diferencias significativas (95%) por efecto de la temperatura. Como puede observarse, para un mismo tipo de arroz, a mayor temperatura de secado aumenta el coeficiente de difusividad; el arroz blanco presenta siempre mayores valores que el integral. En general, los valores obtenidos del coeficiente de difusividad son del mismo orden que los obtenidos por otros autores en el secado de frijoles y arvejas (Ospina y Castro, 2009) y arroz cocido Jazmín de grano largo (Luangmalawat et al., 2008).

La influencia de la temperatura sobre la difusividad efectiva fue analizada con el modelo de Arrhenius, obteniéndose valores de la energía de activación de 18,11 kJ/mol ($R^2=0,94$) para el arroz blanco y de 15,67 kJ/mol ($R^2=0,88$) para el arroz integral.

Dado que el modelo de Fick no parece ajustarse bien a la pérdida de humedad de los granos durante el secado a diferentes temperaturas, ésta se modelizó con dos modelos matemáticos propuestos por Page y Midilli (Ec. 3 y 4). Los parámetros obtenidos en función del tipo de arroz y la temperatura de secado se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de los modelos de secado, R² del ajuste, error estándar estimado y error absoluto medio.

MODELO	Tipo Arroz	Temperatura de Secado (°C)	k (min ⁻¹)	n	b (min ⁻¹)	R ² ajust (%)	Error estándar estimado	Error absoluto medio (MAE)
Midili	Blanco	40	0,0523 ± 0,0018	0,936 ± 0,014	-0,00182 ± 0,00014	99,6217	0,013841	0,017119
		60	0,040 ± 0,003	1,24 ± 0,03	-0,0023 ± 0,0005	99,5489	0,014369	0,020572
		80	0,113 ± 0,008	0,96 ± 0,04	-0,00434 ± 0,00101	99,0609	0,019290	0,028561
Page		40	0,0324 ± 0,0018	1,136 ± 0,017	--	99,1842	0,021376	0,025618
		60	0,033 ± 0,002	1,36 ± 0,03	--	99,3324	0,019643	0,025029
		80	0,089 ± 0,007	1,14 ± 0,03	--	98,5356	0,025037	0,035666
Midili	Integral	40	0,042 ± 0,003	0,86 ± 0,03	-0,0026 ± 0,0004	99,4579	0,014381	0,020226
		60	0,097 ± 0,003	0,68 ± 0,02	-0,0036 ± 0,0004	99,1111	0,018168	0,023868
		80	0,18 ± 0,03	0,69 ± 0,09	-0,0023 ± 0,00019	95,7235	0,035183	0,050642
Page		40	0,026 ± 0,004	1,11 ± 0,04	--	94,0498	0,053362	0,067740
		60	0,059 ± 0,004	0,93 ± 0,02	--	97,8869	0,026313	0,036799
		80	0,155 ± 0,019	0,78 ± 0,05	--	95,6077	0,036179	0,051323

Dados los elevados valores de R^2 ajustada, ambos modelos parecen ajustarse muy bien a los datos experimentales. Sin embargo, no debe considerarse este índice únicamente para comparar modelos de regresión no lineal. En este sentido, los menores valores del error estándar estimado y el error absoluto medio (MAE) obtenidos con el modelo de Midili indican que este modelo predice mejor el comportamiento de los granos de arroz tanto blanco como integral durante el secado a las temperaturas estudiadas.

Este modelo de Midili modificado ha sido ampliamente utilizado por numerosos autores para modelizar el secado de productos vegetales, tales como láminas de puerros (Doymaz, 2008), hojas de menta (Hosseinzadeh et al., 2011), maíz (Corrêa et al., 2011), champiñones (Guo et al., 2011), granos de café (Corrêa et al., 2010) y granos de arroz largo (Corrêa, 2017).

Observando los valores de los parámetros obtenidos en el modelo de Midili, en general, el valor del parámetro k (constante de secado) que representa el efecto de las condiciones externas sobre el secado, aumenta al aumentar la temperatura de secado, lo que ha sido observado por otros autores (Ghazanfari et al. 2007; Ndukwu, 2009), siendo los valores mayores para arroz integral que en blanco. Según Siqueira et al. (2012), la constante k está relacionada con la difusividad efectiva en el periodo de secado de velocidad decreciente, indicando que la velocidad de secado aumenta con la temperatura. En arroz integral, se encontró una relación de k con la temperatura que sigue el modelo de Arrhenius, siendo la $E_a=33,15$ kJ/mol ($R^2=0,99$). Para arroz blanco, el valor obtenido a 60°C no parece seguir esta tendencia.

Por otra parte, el parámetro n , relacionado con la resistencia interna de los granos a la difusión de agua durante el secado, disminuyó significativamente en el arroz integral al aumentar la temperatura. A mayor temperatura del aire de secado, la diferencia de presión de vapor entre el interior del grano y el exterior aumenta, facilitando el transporte de agua y aumentando la velocidad de secado. En arroz blanco, no se encontró una relación clara de este parámetro con la temperatura.

En cuanto al parámetro b , no se observó una relación con la temperatura de secado en ninguno de los tipos de arroz evaluados.

Las figuras 7 y 8 muestran los valores experimentales frente a los dos modelos, observándose que el modelo de Page sufre una desviación sobre los valores experimentales a tiempos largos de secado, al igual que ocurría con el modelo de Fick. Esta desviación también fue observada al analizar la distribución de residuos en el ajuste de los modelos (Figura 9).

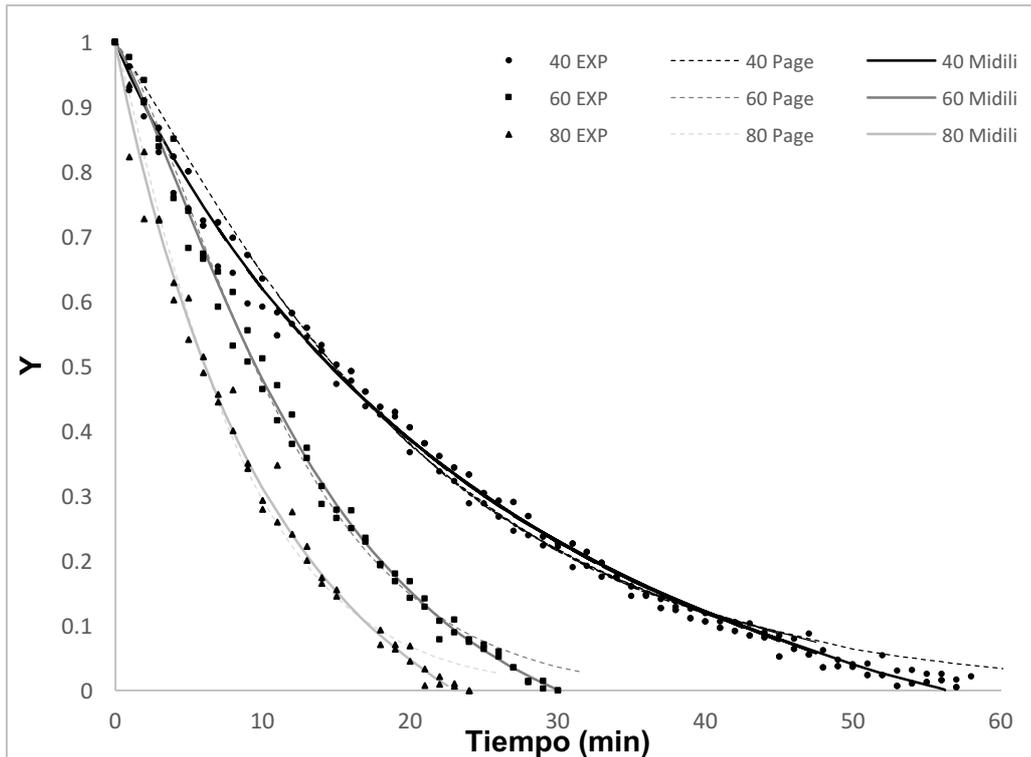


Figura 7. Valores experimentales y ajuste de modelos de Page y Midili en arroz blanco secado a diferentes temperaturas.

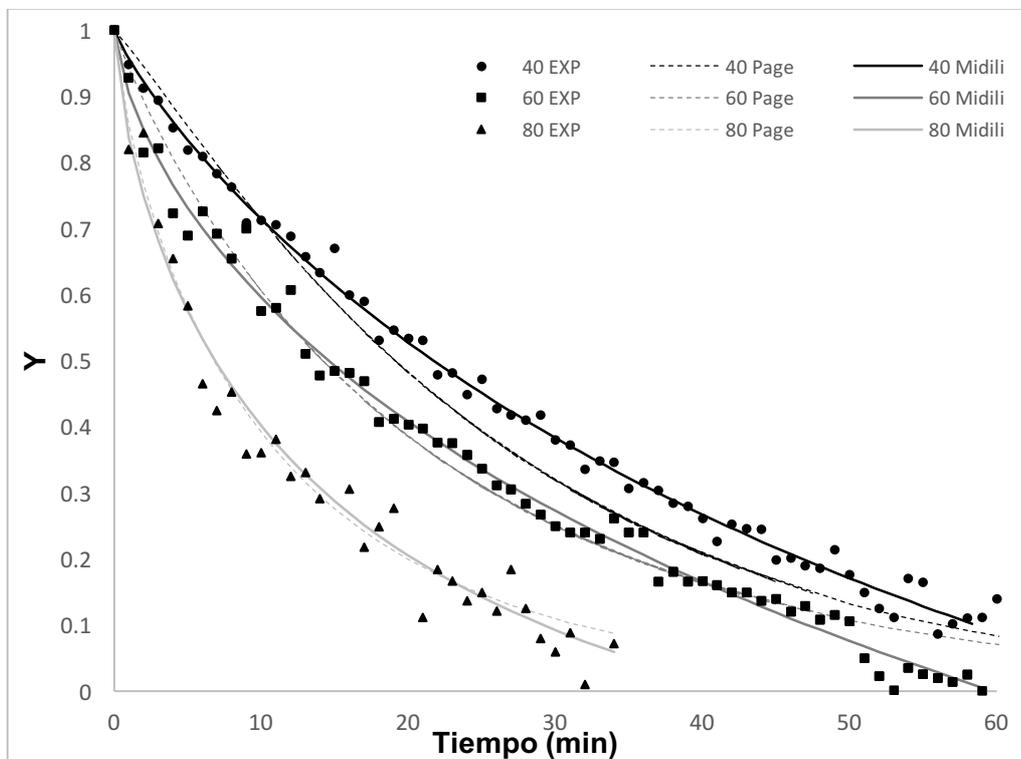


Figura 8. Valores experimentales y ajuste de modelos de Page y Midili en arroz integral secado a diferentes temperaturas.

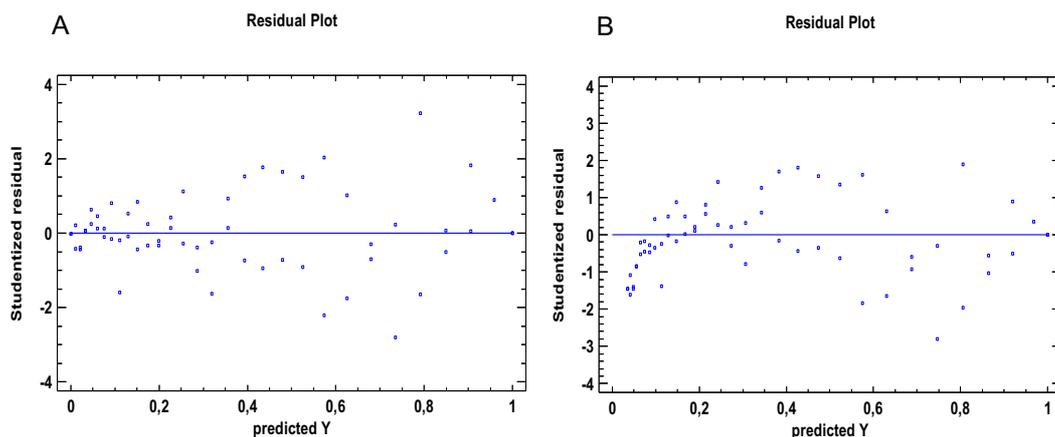


Figura 9. Ejemplo de gráfica de residuos en los modelos ajustados de Midili (A) y Page (B) para arroz blanco secado a 60°C.

En la figura 10 se presentan los resultados de los gráficos de interacciones realizados a los valores de fuerza máxima y consistencia tanto de granos de arroz blanco como integral en función del tiempo de cocción y según la temperatura de secado. Por otra parte, en la tabla 3 se presentan los valores de los cocientes F-ratio obtenidos del ANOVA.

Como puede observarse, tanto los valores de fuerza máxima como de consistencia del arroz integral fueron muy superiores a los del arroz blanco, lo que justifica el mayor tiempo de cocción aplicado al integral. Con 9 minutos de cocción, ambos parámetros mecánicos siguieron siendo superiores a los del arroz blanco cocido durante 5 minutos. Estos resultados son coherentes con las recomendaciones de mayor tiempo de cocción incluidas en los envases del arroz integral respecto al arroz blanco.

En coherencia con lo esperado, conforme progresaba el tiempo de cocción, la firmeza y la consistencia de los granos fueron disminuyendo progresivamente. Sin embargo, en el caso del arroz blanco, sólo se observó un efecto significativo de este descenso entre 4 y 5 minutos de cocción en los granos secados previamente a 60°C. Además, a los 4 minutos de cocción, tanto la firmeza como la consistencia registradas en los granos secados a 40 y a 80°C no mostraron diferencias significativas entre sí. En este sentido, podría recomendarse la temperatura más baja de secado para el pretratamiento del arroz blanco, puesto que no parece modificar las propiedades mecánicas respecto a la temperatura más elevada. En el caso del arroz integral, no se observó ningún efecto claro de la temperatura de secado, por lo que también se recomendaría realizar esta etapa a 40°C para reducir los costes energéticos del proceso. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Colina y Guerra en 2014, que determinaron que no había diferencias significativas en la capacidad de rehidratación de agua en arroz integral previamente

secado a 82 y 93°C, seleccionando así la temperatura que suponía menor gasto energético.

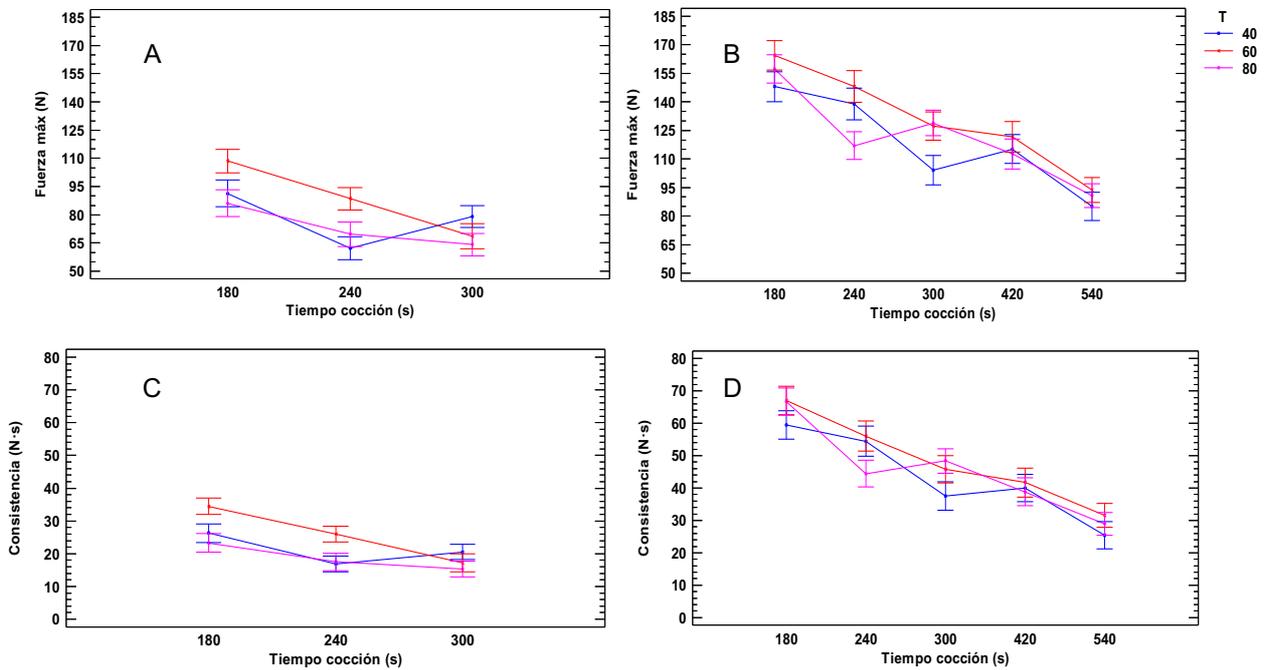


Figura 10. Interacciones del ANOVA realizado a los resultados de fuerza máxima y consistencia de granos de arroz blanco (A y C) e integral (B y D) después de diferentes tiempos en la etapa de cocción

Tabla 3. Cocientes F-ratio del ANOVA realizado en los parámetros mecánicos (Fuerza máxima y Consistencia) del arroz blanco y del arroz integral analizando los factores tiempo de cocción y temperatura de secado

Factor	Arroz Blanco		Arroz Integral	
	Fuerza máxima	Consistencia	Fuerza máxima	Consistencia
Tiempo cocción (A)	24,5**	24,19**	66,78**	61,71**
Temperatura secado (B)	8,88**	11,68**	7,37**	3,37*
AxB	4,92**	4*	2,94*	1,88

*Efecto significativo del 95%

** Efecto significativo del 99%

Por otra parte, en la figura 11 se muestran ejemplos de las imágenes de granos de arroz tras ser sometidos a un aplastamiento utilizando dos superficies lisas transparentes para evaluar la presencia o ausencia de zonas blanquecinas en el núcleo del grano asociadas a la falta de cocción del arroz, siguiendo el procedimiento descrito por Chakkaravarthi *et al.*, (2008).

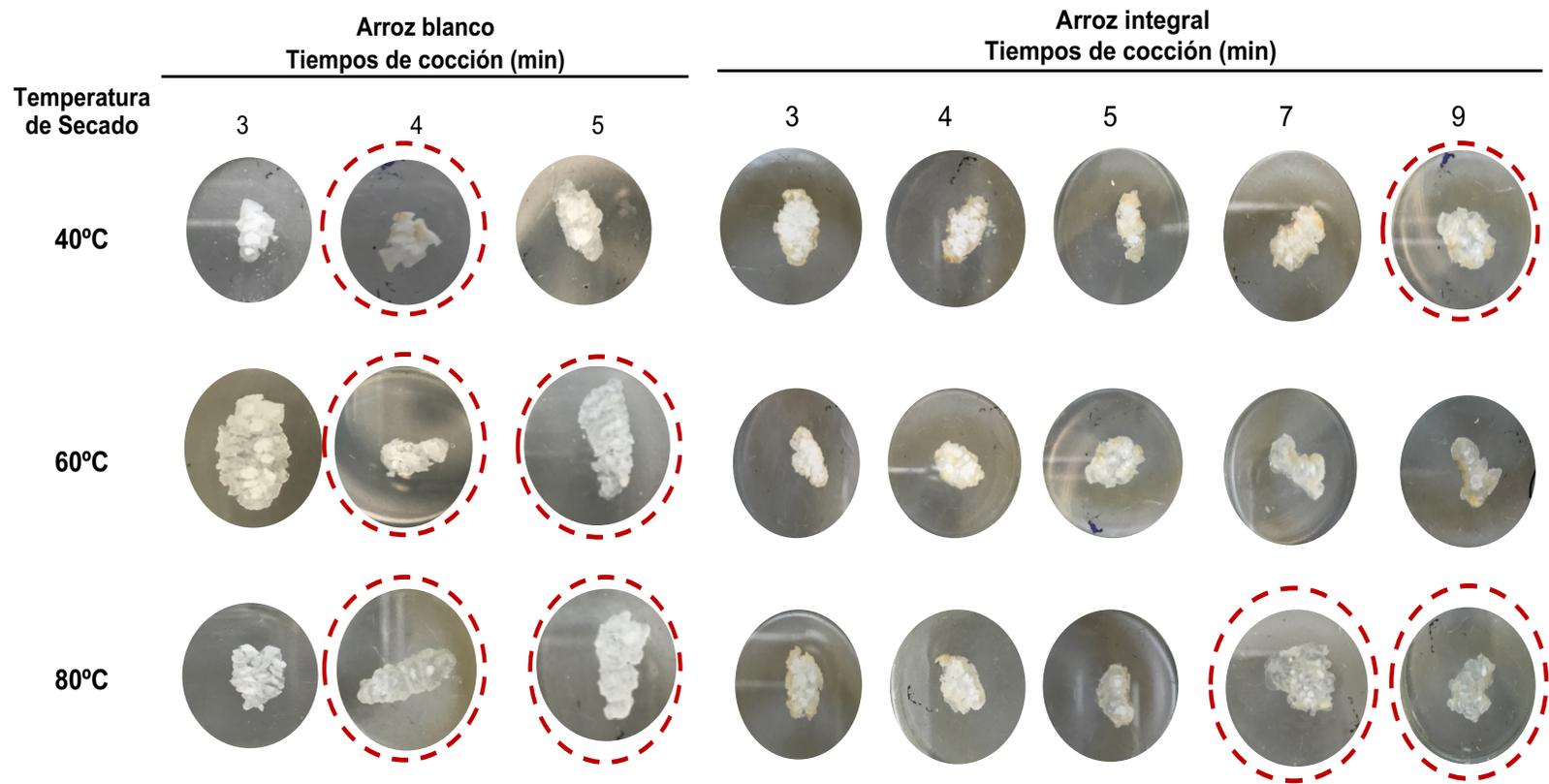


Figura 11. Ejemplos del análisis de textura visual de los granos secados a diferentes temperaturas y cocidos a diferentes tiempos

En la misma, se han rodeado con un círculo rojo discontinuo los casos en los que el arroz se considera suficientemente cocido por la desaparición de esa zona blanquecida central. Como puede apreciarse, en el arroz blanco cocido durante 3 minutos, las zonas blanquecinas fueron mayoritarias al resto de los tiempos, lo que sería coherente con los resultados obtenidos del análisis instrumental de la textura, comentado anteriormente. No obstante, en el caso del arroz integral, esta diferenciación es más compleja y según el análisis visual de la textura, sólo se apreció una desaparición clara de la zona blanquecina central del arroz para el máximo tiempo de cocción (9 minutos) y sólo cuando la temperatura de secado fue de 40 y de 80°C. Según estos resultados, el arroz blanco sí que habría alcanzado condiciones de textura adecuadas para su consumo, mientras que, en el integral, se necesitaría aumentar ligeramente el tiempo de cocción para satisfacer el nivel de textura.

De acuerdo a las recomendaciones establecidas por Juliano en 1985, una reducción del 45% del tiempo de cocción respecto al convencional de preparación del arroz es suficiente para catalogar el arroz como de rápida de cocción. En este estudio se pone de manifiesto que la reducción del tiempo de cocción para el arroz blanco podría establecerse entre un 72-77%, dependiendo de si se cuece durante 4 ó 5 minutos, respectivamente. Para el arroz integral, asumiendo que probablemente con 10 minutos de cocción se alcanzaría un óptimo nivel de textura, la reducción del tiempo de cocción sería de un 60%. Por tanto, en ambos casos se cumpliría el criterio establecido propuesto por Juliano (1985).

Respecto a los resultados de rehidratación de los granos de arroz blanco e integral, en la figura 12 se presentan los porcentajes de agua absorbida en función del tiempo de cocción y la temperatura previa de secado. Como puede observarse a mayor temperatura de secado, el porcentaje de absorción de agua de los granos de arroz aumentó, siendo mucho más evidente el efecto de la temperatura de secado para el arroz integral, pero éste absorbió menos agua que el blanco. Estos resultados son coherentes con los mayores valores de las propiedades mecánicas registradas para el arroz integral. El arroz integral posee capas de salvado que proporcionan una barrera a la hidratación, lo cual lleva a una penetración de agua más lenta al interior del endospermo y, en consecuencia, el tiempo necesario para alcanzar los niveles de rehidratación deseados es mayor si se compara con el arroz blanco (Colina y Guerra, 2014).

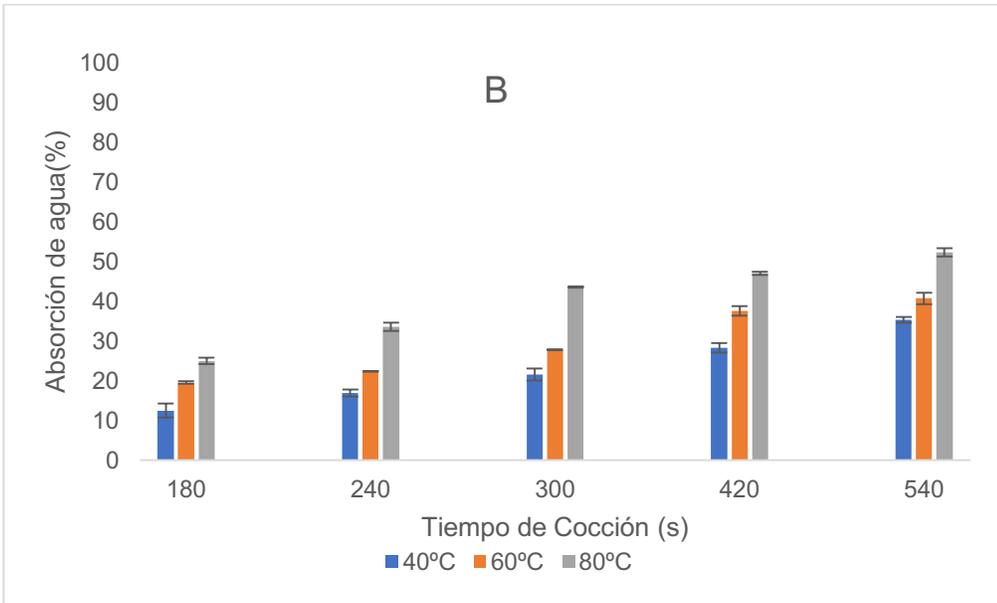
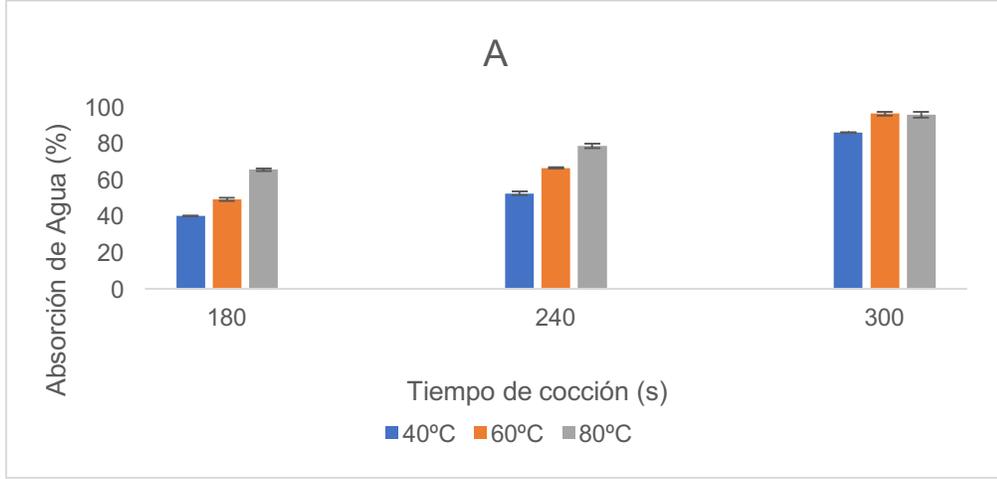


Figura 12. Porcentaje de absorción de agua de los granos de arroz blanco (A) e integral (B) según el tiempo de cocción y en función de la temperatura de secado previa

4. CONCLUSIONES

El secado de granos de arroz redondo tipo Senia se ajusta mejor al modelo matemático de Midilli modificado que a los modelos de Fick y Page, obteniéndose valores de la constante de secado mayores a medida que aumenta la temperatura de secado. Tras el secado, la capacidad de absorción de agua de los granos durante la cocción a 100°C, varían en función de la temperatura de secado, con mayores diferencias en el arroz integral. Sin embargo, estas diferencias no son significativas en los parámetros mecánicos evaluados (consistencia y fuerza máxima), por lo que se recomendaría una temperatura de secado de 40°C por el menor gasto energético del proceso.

La mayor capacidad de absorción de agua en el arroz blanco se da a los 5 minutos, mientras que en el integral supera los 9 minutos, coincidiendo con el punto de cocción óptimo evaluado por un método no instrumental. Por tanto, se consigue reducir el tiempo de cocción del arroz blanco en un 75% y del integral en un máximo del 60% con respecto a un arroz tradicional.

Con esta investigación se sientan bases para que en próximos estudios se analicen otros factores de gran relevancia como son las propiedades físicas y atributos sensoriales, que permita a la agroindustria la producción a gran escala de arroz tipo Senia de rápida cocción.

5. BIBLIOGRAFIA

- Altamirano, M. (2017). Estudio de la cinética de hidratación de arroz tipo “senia” blanco e integral. Tesis Fin de Master, Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/87857>
- Colina, J., & Guerra, M. (2009). Obtención y evaluación de arroz integral de cocción rápida. *Interciencia*, 34(10).
- Consejo Regulador Denominación de Origen Arroz de Valencia (2017) Historia del Arroz en Valencia [En línea], Disponible en: <http://www.arrozdevalencia.org/variedades-2/>. Fecha de consulta: 23/11/2017
- Chakkaravarthi, A., Lakshmi, S., Subramanian, R., & Hegde, V. M. (2008). Kinetics of cooking unsoaked and presoaked rice. *Journal of food engineering*, 84(2), 181-186.
- Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural (2017) D.O. Arroz de Valencia. [en línea] Disponible en: <http://www.agroambient.gva.es/web/desarrollo-rural/crdop-arroz-de-valencia>. Fecha de consulta: 1/12/17
- Corrêa, P. C., Goneli, A. L., Junior, P. C., De Oliveira, G. H., & Valente, D. S. (2010). Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in different processing levels. *International journal of food science & technology*, 45(10), 2016-2022
- Corrêa, P. C., Botelho, F. M., Oliveira, G. H. H., Goneli, A. L. D., Resende, O., & Campos, S. D. C. (2011). Mathematical modeling of the drying process of corn ears. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 33(4), 575-581.

- Corrêa, P. C., de Oliveira, G. H. H., de Oliveira, A. P. L. R., Botelho, F. M., & Goneli, A. L. D. (2017). Thermodynamic properties of drying process and water absorption of rice grains. *CyTA-Journal of Food*, 15(2), 204-210.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*. Ed. Clarendon Press Oxford.
- Doymaz, I. (2008). Drying of leek slices using heated air. *Journal of food process engineering*, 31(5), 721-737.
- FAO (2017). Seguimiento del Mercado del Arroz. [en línea] Disponible en: <http://www.fao.org/economic/est/publications/publicaciones-sobre-el-arroz/seguimiento-del-mercado-del-arroz-sma/es/>. Fecha de consulta: 17/11/2017.
- Guo, X. H., Xia, C. Y., Tan, Y. R., Long, C. H. E. N., & Jian, M. I. N. G. (2014). Mathematical modeling and effect of various hot-air drying on mushroom (*Lentinus edodes*). *Journal of Integrative Agriculture*, 13(1), 207-216.
- Hosseinzadeh, B., Khoshtaghaza, M. H., Mahdavian, A., & Najafi, G. H. (2011). Analyses and modelling of moisture desorption at different methods of mint (*Mentha spicata* Huds) leaves drying. *Thai Journal of Agricultural Science*, 45(1), 1-9.
- Infoalimentación (2017) Alimentos precocinados [en línea] Disponible en: http://www.infoalimentacion.com/documentos/alimentos_precocinados.htm. Fecha de consulta: 17/11/2017.
- Juliano BO (1985) *Rice: Chemistry and Technology*. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN, EEUU. 774 pp.
- Luangmalawat, P., Prachayawarakorn, S., Nathakaranakule, A., & Soponronnarit, S. (2008). Effect of temperature on drying characteristics and quality of cooked rice. *LWT-Food Science and Technology*, 41(4), 716-723.
- Ndukwu, M. C. (2009). Effect of drying temperature and drying air velocity on the drying rate and drying constant of cocoa bean. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
- Ospina, J. F. A., & Castro, R. A. F. (2009). Aplicación de la ley de fick y el modelo de peleg para estudiar la absorción de agua en el frijol cargamanto ombligo amarillo (*phaseolus vulgaris* l.) y la arveja seca (*pisan sativa*) durante la rehidratación. *Publicaciones e Investigación*, 3(1), 15-28.
- Siqueira, V. C., Resende, O., & Chaves, T. H. (2012). Drying kinetics of *jatropha* seeds. *Revista Ceres*, 59(2), 171-177.
- Sociedad Española de Nutrición Básica y Aplicada (2004) Alimento Precocinados [En línea] Disponible en: <https://www.fen.org.es/storage/app/media/imgPublicaciones/3152007612.pdf> Fecha de consulta: 18/11/2017
- Yu, L., Turner, M. S., Fitzgerald, M., Stokes, J. R., & Witt, T. (2016). Review of the effects of different processing technologies on cooked and convenience rice quality. *Trends in Food Science & Technology*, 59, 124-138