



Artículo

Efecto de las condiciones de secado sobre el endurecimiento de los granos de caraota (*Phaseolus vulgaris*) pretratados con vapor

Effect of drying conditions on hardening of beans (*Phaseolus vulgaris*) steamed

María Virginia Mujica^{1*}, Marisela Granito², Naudy Soto¹, Ligda Díaz¹

¹Departamento de Procesos Agroindustriales, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Barquisimeto, 3001, Venezuela.

²Departamento de Tecnología de Servicios, Universidad Simón Bolívar. Caracas, 1090A, Venezuela.

*Autora para correspondencia: mvmujica@ucla.edu.ve

Aceptado 21-Diciembre-2017

Resumen

El endurecimiento de los granos de caraota (*Phaseolus vulgaris*) generado por el almacenamiento en condiciones de alta temperatura y humedad relativa representa una limitante importante para su consumo. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de un tratamiento con vapor y luego secado a los granos de *P. vulgaris* recién cosechados en la prevención de su endurecimiento. Inicialmente, se construyeron las curvas de secado a 40; 47,5 y 55 °C. Seguidamente, los granos se trataron con vapor por 8 min 20 s y se sometieron a un proceso de secado, bajo un diseño central compuesto cuyos factores fueron la temperatura del aire (40 y 55 °C) y el tiempo de secado (4 y 8 h). La muestra secada de cada tratamiento se dividió en 3 lotes, el primero se analizó de inmediato y los otros se almacenaron por 5 semanas bajo 2 condiciones distintas 5 °C/34 % HR y 37 °C/75 % HR. Las determinaciones realizadas fueron humedad, capacidad de imbibición, tiempo de cocción y actividad de la peroxidasa soluble. El tiempo de secado fue de 6,5; 5 y 2,5 h a 40; 47,5 y 55 °C, respectivamente, para alcanzar una humedad de 13 % (b.s.). El coeficiente de difusión resultó igual a $3,40 \times 10^{-9}$; $3,52 \times 10^{-9}$ y $3,87 \times 10^{-9}$ m²/s, a 40, 47,5 y 55 °C, respectivamente. El valor de la energía de activación fue de 7,33 kJ/mol. La aplicación de vapor y posterior secado de los granos no previno su endurecimiento, y este no dependió de la actividad de la peroxidasa soluble. Por lo que se puede inferir que los compuestos fenólicos y la enzima peroxidasa no son los únicos implicados en el mecanismo de endurecimiento de los granos de *P. vulgaris*.

Palabras claves: curvas de secado, *Phaseolus vulgaris*, peroxidasa, tiempo de cocción.

Abstract

Hardening beans (*Phaseolus vulgaris*) generated by storage under high temperature and relative humidity represents a major constraint for consumption. The aim of this study was to evaluate the effect of treatment with steam and then dried beans freshly harvested in preventing hardening. Initially, the drying curves were constructed to 40; 47.5 and 55 °C. Then, the beans were steamed for 8 min 20 s and subjected to a drying process under a central composite design whose factors were air temperature (40 to 55 °C) and the drying time (4 to 8 h). The dried sample from each treatment was divided into 3 batches, the first analyzed immediately and the others were stored for 5 weeks under 2 different conditions 5 °C/34 % RH and 37 °C/75 % RH. Determinations were moisture, imbibition capacity, cooking time and soluble peroxidase activity. The drying time was 6.5; 5 and 2.5 h at 40; 47.5 and 55 °C, respectively, to achieve a 13 % moisture (d.b.). The diffusion coefficient was equal to 3.40×10^{-9} ; 3.52×10^{-9} and 3.87×10^{-9} m²/s, 40, 47.5 and 55 °C, respectively. The value of the activation energy was 7.33 kJ/mol. The application of steam and subsequent drying of grains did not prevent hardening, and this did not depend on the activity of soluble peroxidase. As it can be inferred that the phenolic compounds and the peroxidase enzyme are not the only ones involved in the hardening mechanism of the grains of *P. vulgaris*.

Keywords: cooking time, drying curves, *Phaseolus vulgaris*, peroxidase.

INTRODUCCIÓN

La calidad culinaria de las leguminosas de grano comprende un conjunto de atributos percibidos por los consumidores en los cuales se basan sus preferencias de compra. Los consumidores desean granos que requieran cortos tiempos de cocción, de textura y sabor agradables, testa delgada, que produzcan un caldo espeso y que no generen flatulencias. El color, forma y tamaño del grano son atributos que también influyen en la aceptabilidad de los consumidores (Bressani, 1989; Casañas *et al.*, 2006).

Así como el rendimiento y la resistencia a plagas y enfermedades son los factores más importantes desde el punto de vista agronómico, la facilidad o calidad de cocción lo es desde el punto de vista culinario. Reyes-Moreno *et al.* (1993) mencionan que los aspectos relacionados con la calidad de cocción no habían recibido la suficiente atención dentro de los programas de mejoramiento genético de las leguminosas de grano. Los fitomejoradores

conscientes de que el ritmo de vida se ha acelerado notablemente y que los consumidores prefieren los alimentos de preparación fácil y rápida, han dado mayor importancia a la calidad culinaria de las leguminosas y en este sentido se han realizado estudios para evaluar este aspecto en las variedades mejoradas (Saha *et al.*, 2009; Ribeiro *et al.*, 2013; Rivera *et al.*, 2016).

El ‘hard to cook’ o “duro para cocinar” es un defecto de textura que afecta a las leguminosas de grano almacenadas por largos períodos en condiciones de alta temperatura y alta humedad relativa, y se define como la resistencia de los granos a ablandarse durante la cocción (Aguilera y Rivera, 1992). A nivel microestructural se caracteriza por una falla en la separación de las células de los cotiledones durante la cocción, causada por la rigidez de la pared celular y específicamente por la resistencia de la laminilla media a disolverse.

El efecto del tiempo, la temperatura y la humedad relativa de almacenamiento sobre la dureza de los granos depende del nivel de cada uno de estos factores, pues existe una

interacción significativa entre ellos. Reyes-Moreno *et al.* (2001) afirman que el almacenamiento a temperaturas superiores a 25 °C y humedades relativas por encima de 65 % promueven el endurecimiento de los granos, condiciones que pueden alcanzarse fácilmente en zonas con climas tropicales y subtropicales, las cuales abundan en los países de América Latina.

Bressani (1989) menciona algunas acciones para prevenir o reducir el 'hard to cook' como almacenamiento adecuado a baja temperatura y baja humedad relativa, aplicación de calor para destruir la actividad enzimática, remojo en soluciones de cloruro de sodio, y algunas prácticas de cultivo como la aplicación de potasio y de sodio al suelo. También se han dirigido esfuerzos hacia el desarrollo de granos de cocción rápida o precocidos (Bellido *et al.* 2003). Reyes-Moreno *et al.* (2001) indican que algunos de los procedimientos propuestos para prevenir el 'hard to cook' son el almacenamiento apropiado, uso de atmósferas controladas y ciertos pretratamientos como vaporización, tostado, irradiación, secado solar y microondas.

En la presente investigación se aplicó un tratamiento con vapor y luego secado a los granos de *Phaseolus vulgaris* recién cosechados para evaluar su efecto en la prevención del endurecimiento generado en condiciones de alta temperatura y alta humedad relativa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Se utilizó una muestra recién cosechada de *Phaseolus vulgaris* (material SA029), suministrada por el Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CENIAP), Venezuela. Esta muestra fue almacenada en condiciones de refrigeración hasta el momento de realizar los ensayos.

Curvas de secado

En el estudio del tratamiento con vapor y secado de los granos como tratamiento preventivo de su endurecimiento poscosecha, se evaluó el efecto de la temperatura y el tiempo de secado. Para ello, inicialmente se elaboraron las curvas de secado para cada temperatura (40; 47,5 y 55 °C) del diseño experimental, con el fin de determinar los niveles del factor tiempo de secado. Se distribuyó uniformemente una muestra de 105 g de granos tratados con vapor en una bandeja de 32 x 20 cm, formando una sola capa. Previamente, se tomó una muestra para la determinación de la humedad inicial. El secado se llevó a cabo por 24 horas, durante el cual se registró:

- La variación del peso utilizando una balanza de precisión electrónica, en intervalos de 1 minuto hasta los 60 minutos, luego en intervalos de 5 minutos hasta alcanzar la humedad de equilibrio.
- Las temperaturas de bulbo seco, bulbo húmedo y ambiente al inicio y al final del secado.

Tratamiento con vapor de los granos

Los granos crudos de *P. vulgaris* fueron acondicionados hasta un contenido de humedad de 18,5 %. La humedad se determinó por deshidratación en estufa a 105 °C por 24 h.

Con el fin de seleccionar el tiempo de tratamiento con vapor de los granos se realizó un estudio de inactivación de la peroxidasa soluble con vapor a 95 °C y presión atmosférica. Los tiempos aplicados fueron 1, 2, 4, 8, 16 y 32 min y se tomó como actividad enzimática inicial (A_0) la de los granos no tratados. El tiempo seleccionado fue el mínimo necesario para inactivar completamente la peroxidasa soluble. Como resultado de este ensayo, los granos se trataron con vapor por 8 min 20 s.

La actividad de la peroxidasa se determinó de acuerdo al método de Yang y Uchiyama (2000) modificado. Para ello, se suspendieron 0,5 g de muestra, consistente en granos molidos hasta un tamaño de partícula inferior a 0,5 mm, en 20 mL de buffer fosfato de sodio 0,1 M (pH 6,5) parcialmente congelado, con 0,5 % de polivinilpirrolidona. Se homogenizó por 30 s a 15000 rpm en un POLYTRON® 3100 (KINEMATICA, Inc., Bohemia, NY, USA) y luego se centrifugó a 20000 g por 20 min a 4 °C en una ultracentrífuga Optima™ L-100 XP (Beckman Coulter, Inc., USA). El sobrenadante se utilizó para medir la actividad de la peroxidasa soluble, con el sistema extracto enzimático-guayacol-peróxido de hidrógeno. Para lo cual se mezclaron 2,7 mL de la solución sustrato con 0,3 mL del extracto en una cubeta de cuarzo. Después de 5 s, se comenzó a medir la absorbancia a 470 nm cada 15 s durante 180 s con un espectrofotómetro DU® 640 (Beckman Coulter, Inc., USA). La solución sustrato consistió en 1 % de guayacol y 1 % de peróxido de hidrógeno (30 % v/v) en buffer fosfato de sodio 0,1 M (pH 6,5).

Secado

La deshidratación se realizó en un secador de bandejas UOP8 (Armfield Limited, UK), bajo un diseño factorial 2². Los factores a evaluar fueron la temperatura del aire (40 y 55 °C) y el tiempo de secado (4 y 8 h). La selección de los niveles del factor temperatura se basó en las limitaciones operativas del secador. Con respecto al tiempo de secado la selección se hizo en función de las curvas de secado.

En el diseño factorial se incluyeron 3 puntos centrales y 4 puntos axiales, para un total de 11 de tratamientos, obteniéndose así un diseño central rotacional compuesto. Los tratamientos, señalados en el Cuadro 1, se efectuaron aleatoriamente para evitar resultados sesgados.

La humedad relativa promedio del aire de secado fue de 54 %, y su velocidad se mantuvo constante y se midió con un anemómetro LCA 6000 (AIRFLOW™ Instruments, UK), perpendicularmente a la sección de salida del aire, resultando en promedio igual a 0,78 m/s.

La muestra secada de cada tratamiento se dividió en 3 lotes, el primero se analizó de inmediato y los otros se almacenaron por 5 semanas bajo 2 condiciones distintas 5 °C/34 % HR y 37 °C/75 % HR; y al cabo de ese tiempo fueron analizados. Adicionalmente, se consideraron 2 muestras para efectos de comparación, una no tratada con vapor ni secada (tratamiento 12) y otra solo tratada con vapor (tratamiento 13), las cuales también se almacenaron bajo las condiciones mencionadas.

La humedad, capacidad de imbibición, tiempo de cocción y actividad de la peroxidasa soluble fueron las variables de respuesta del diseño. La humedad y la actividad de la peroxidasa soluble se determinaron de acuerdo a los métodos descritos previamente. Para medir la capacidad de imbibición se colocaron 10 g de granos en 50 mL de agua desionizada durante 18 h a temperatura ambiental, seguidamente se removieron los granos del agua, se lavaron con agua desionizada, se separó la testa de los cotiledones, se secaron todas las fracciones con papel absorbente y finalmente se pesaron. Se tomó en cuenta los sólidos perdidos en las aguas de remojo y lavado para corregir el valor de la capacidad de imbibición. El tiempo de cocción de los granos se cuantificó con un equipo denominado "Mattson cooker". Este equipo constaba de 25 barras de 90 ± 1 g de peso, cada una de las cuales se colocó sobre un grano. Se registró el tiempo en el cual caía cada barra penetrando el grano cocido y se tomó como tiempo de cocción el promedio de los tiempos correspondientes a las barras 12 y 13, de acuerdo a lo establecido por Maurer *et al.* (2004).

Cuadro 1.- Tratamientos de secado, bajo un diseño 2^2 ampliado con puntos axiales.

Tratamiento	Temperatura		Tiempo	
	Codificada	No codificada (°C)	Codificada	No codificada (h)
1 ^a	-1	40	1	t ₁
2 ^a	-1	40	-1	t ₋₁
3 ^a	1	55	1	t ₁
4 ^a	1	55	-1	t ₋₁
5 ^b	- α	36,9	0	t ₀
6 ^b	α	58,1	0	t ₀
7 ^b	0	47,5	α	t _{α}
8 ^b	0	47,5	- α	t _{-α}
9 ^c	0	47,5	0	t ₀
10 ^c	0	47,5	0	t ₀
11 ^c	0	47,5	0	t ₀

^a: punto factorial (1: nivel alto, -1: nivel bajo). ^b: punto axial. ^c: punto central.

Análisis estadístico

A partir del diseño experimental aplicado para el estudio del efecto del tratamiento con vapor-secado sobre las variables de respuestas se generaron modelos de segundo orden y sus superficies de respuesta. Estas últimas se representaron en gráficos tridimensionales, mostrando el efecto de 2 variables independientes, sobre la variable de respuesta. Estos análisis se hicieron a través del programa Statgraphics® Plus, versión 4.0 (Statistical Graphics Corporation, Warrenton, VA, USA) y para la validez de los resultados obtenidos se procedió a verificar los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianza e independencia. La prueba *a posteriori* utilizada fue la prueba de rango múltiple de Duncan.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Curvas de secado

Se graficaron las curvas de secado para las temperaturas de 40, 47,5 y 55 °C, con el fin de determinar la cinética de secado de los granos. En la Fig. 1 se muestra la variación de la humedad de los granos con el tiempo de secado, según la cual se requiere un tiempo de 6,5; 5 y 2,5 h a 40, 47,5 y 55 °C, respectivamente, para alcanzar una humedad de 13 % (b.s.), valor máximo establecido para un almacenamiento seguro de los granos (da Silva, 2005; Resende *et al.*, 2005).

Las curvas de secado a las temperaturas evaluadas se muestran en la Fig. 2, y en ellas se observa que la velocidad de secado se

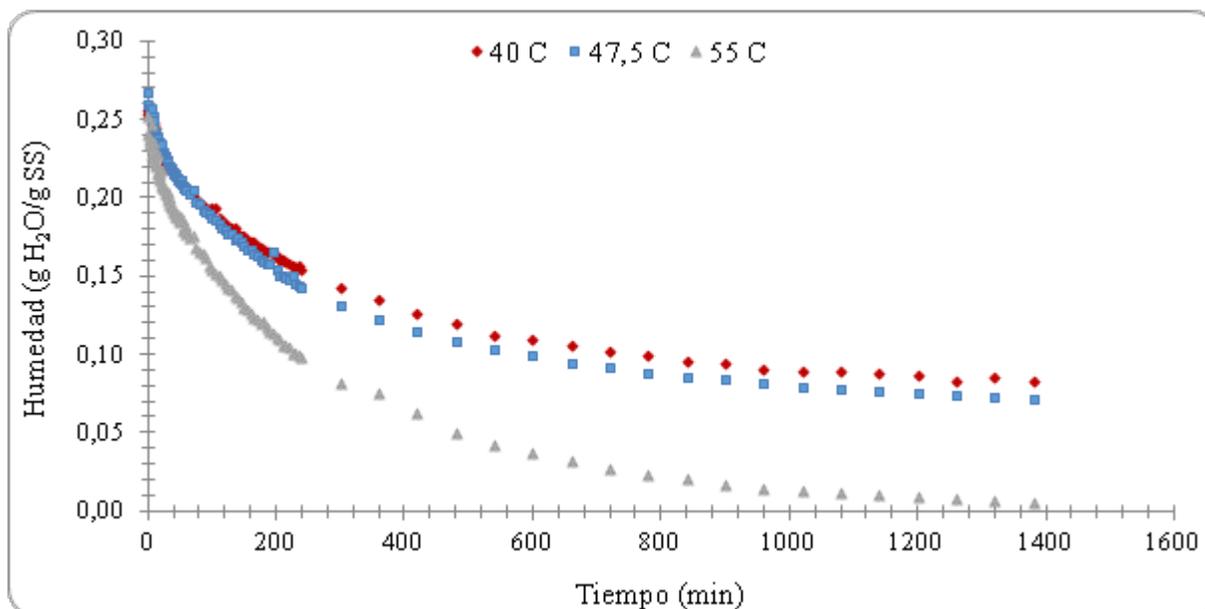


Figura 1.- Variación de la humedad durante el secado de *Phaseolus vulgaris*.

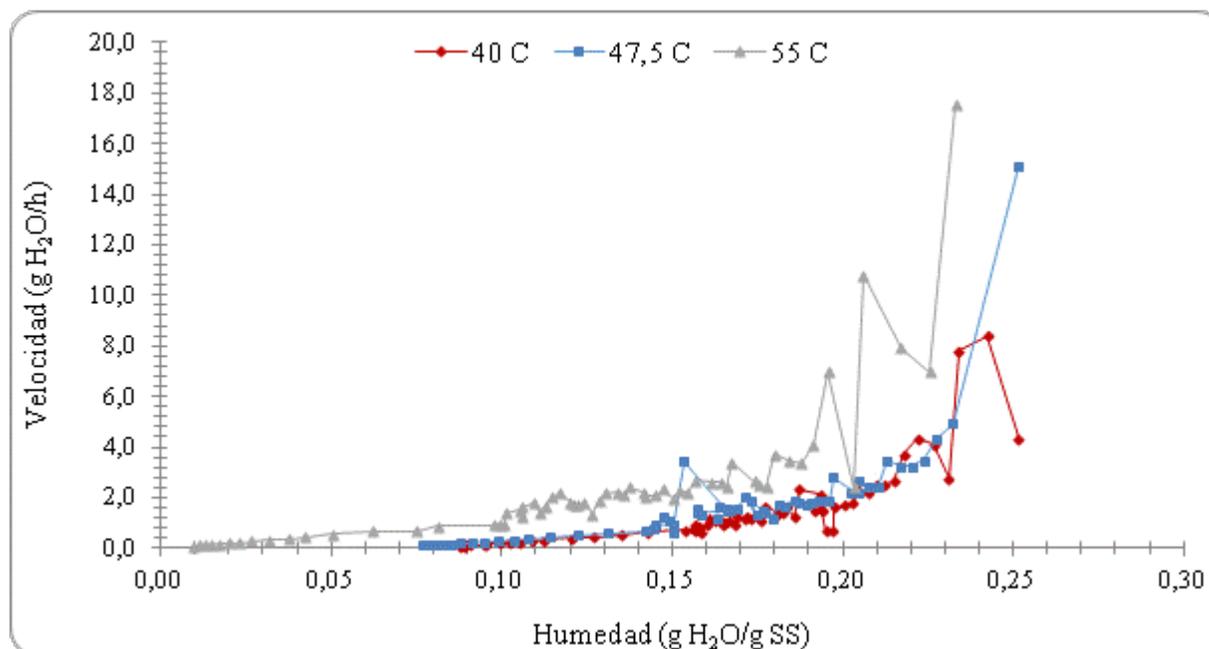


Figura 2.- Curvas de velocidad de secado de *Phaseolus vulgaris*.

incrementó con la temperatura, principalmente a 55 °C. Por otra parte, para una misma temperatura la velocidad de secado es elevada al inicio del secado y luego disminuye hasta alcanzar la humedad de equilibrio. También se distingue que los puntos de la curva de secado a 47,5 °C resultaron menos erráticos en comparación con las curvas a 40 y 55 °C, debido posiblemente a un menor efecto de las corrientes de aire sobre la lectura de la balanza acoplada al secador.

La forma de las curvas de secado para las 3 temperaturas evaluadas (Fig. 2) revela que este proceso estuvo dentro del período de velocidad decreciente, lo cual es típico en la deshidratación de granos con humedades inferiores al valor crítico, y concuerda con lo encontrado por Mello *et al.* (2016) para granos de *Phaseolus vulgaris*. La velocidad de secado en este período depende de la velocidad de difusión de la humedad dentro del sólido y por lo tanto no es afectada por variables externas como la humedad relativa y la velocidad del aire de secado.

Cuando el proceso de secado ocurre en el período de velocidad decreciente, la difusión es el proceso controlante y la humedad se desplaza hacia la superficie, a consecuencia de la difusión molecular. Por lo tanto, puede describirse el proceso de evaporación durante el secado del material sólido a través de modelos matemáticos que consideran, como mecanismo principal, la difusión basada en la segunda ley de Fick, donde, el flujo o la difusión es unidimensional y la concentración de agua es función de la posición x y el tiempo t . En tal sentido, el coeficiente de difusión, D , se determinó utilizando la Ec. 1, integrada de la segunda ley de Fick para tiempos largos y geometría esférica, despreciando la contracción volumétrica de los granos.

$$\text{Ecuación (1)} \quad \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 \cdot D \cdot t}{r^2}\right]$$

Donde:

X : Humedad (b.s.) en el instante t , g H₂O/g SS.

X_e : Humedad de equilibrio (b.s.), g H₂O/ g SS.

X_i : Humedad inicial (b.s.), g H₂O/ g SS.

r : radio de una esfera equivalente al volumen promedio de 10 granos de *P. vulgaris*

Al graficar $\ln\left(\frac{X - X_e}{X_i - X_e}\right)$ en función del

tiempo (t), el coeficiente de difusión D puede obtenerse a partir de la pendiente de la recta, tal como se indica en la Fig. 3.

El coeficiente de difusión resultó igual a $3,40 \times 10^{-9}$; $3,52 \times 10^{-9}$ y $3,87 \times 10^{-9}$ m²/s, a 40, 47,5 y 55 °C, respectivamente, y su incremento con la temperatura de secado reveló una disminución de la resistencia interna del sólido a la transferencia de masa. Estos resultados concuerdan con los coeficientes obtenidos por Resende *et al.* (2008) para granos de *P. vulgaris* de los grupos comerciales “vermelho” y “preto”, en un intervalo de $0,139 \times 10^{-9}$ a $4,826 \times 10^{-9}$ m²/s para temperaturas de 35 y 45 °C. Morais *et al.* (2013) determinaron coeficientes de difusión en el intervalo de $8,84 \times 10^{-8}$ a $20,17 \times 10^{-8}$ m²/s durante el secado de granos de frijol “caupi” (*Vigna unguiculata* L.), para temperaturas de 25 y 55 °C.

En relación al efecto de la temperatura sobre el coeficiente de difusión se pudo describir a través de la ecuación de Arrhenius, por lo que al graficar el $\ln(D)$ en función del inverso de la temperatura absoluta de la pendiente (Fig. 4) se obtuvo el valor de la energía de activación (E_a), igual a 7,33 kJ/mol.

Evaluación del tratamiento con vapor y secado de los granos

Se aplicó un tratamiento con vapor por 8 min 20 s, y luego secado a los granos de *P. vulgaris* recién cosechados para evaluar su efecto en la prevención del endurecimiento generado en condiciones de alta temperatura y alta humedad relativa.

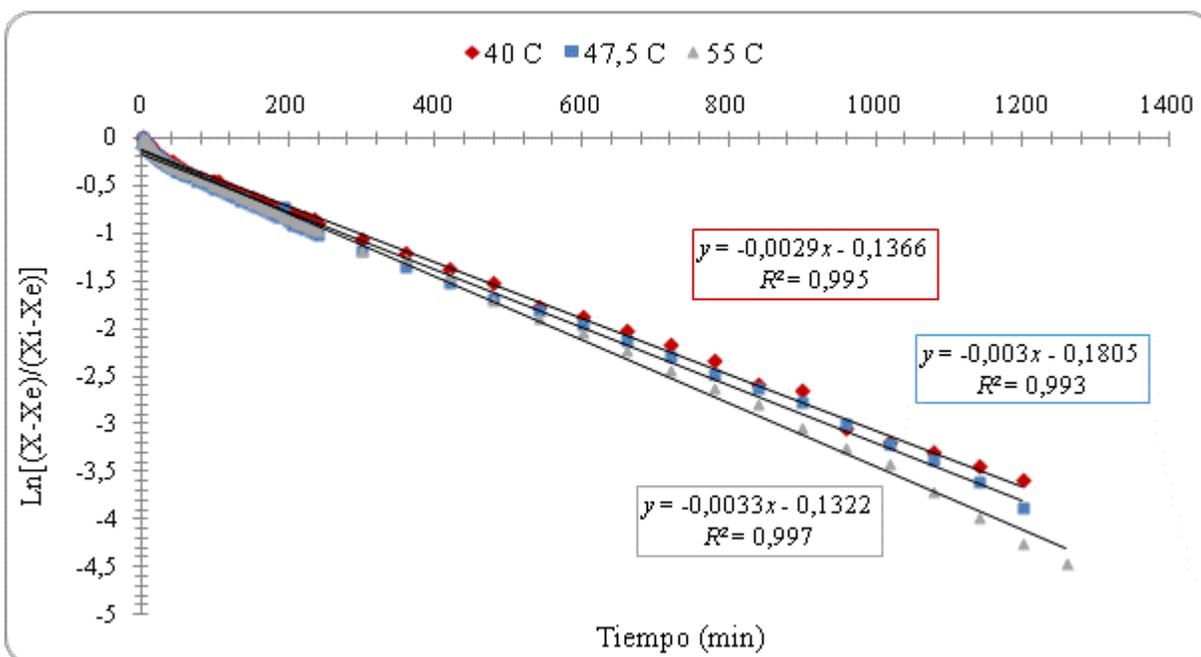


Figura 3.- Correlación logarítmica para las curvas de secado de *P. vulgaris* a 40; 47,5 y 55 °C.

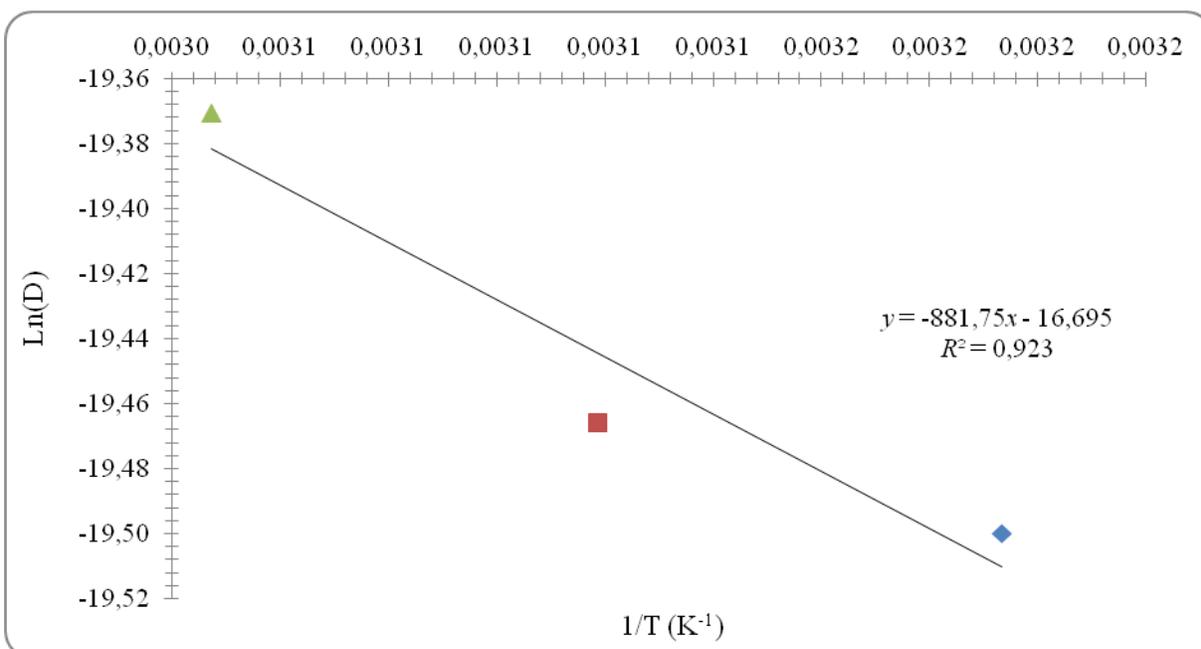


Figura 4.- Dependencia térmica del coeficiente de difusión (D) de los granos de *P. vulgaris* secados a 40; 47,5 y 55 °C.

Las condiciones de secado, ensayadas de acuerdo al diseño experimental mostrado en el Cuadro 1, afectaron significativamente ($p \leq 0,05$) la humedad de los granos “control”, tal como se indica en el análisis de varianza del Cuadro 2, y de acuerdo a la superficie de respuesta generada (Fig. 5) el valor mínimo de humedad 10,0 g/100 g se consigue secando a 58,1 °C por 5,9 h; en tanto que la temperatura y el tiempo de secado no afectaron significativamente ($p > 0,05$) la humedad de los granos almacenados, en ninguna de las condiciones evaluadas. Por el contrario, hubo un efecto significativo ($p \leq 0,05$) de la condición de almacenamiento, resultando inferior la humedad de los granos conservados a baja temperatura/baja humedad relativa (BTBH), y sin diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los granos “control” y los almacenados a alta temperatura/alta humedad relativa (ATAH), como puede observarse en la Fig. 6.

El contenido de humedad de los granos almacenados ha sido relacionado con la dureza de los mismos, de manera que el almacenamiento con elevados contenidos de humedad resulta en granos más duros. En este sentido, Aguilera y Rivera (1990) afirman que el contenido de humedad para el almacenamiento de *P. vulgaris* entre 10 y 14 g/100 g es suficientemente bajo para retardar el endurecimiento. Los valores determinados en este estudio se encontraron entre 9,71 y 16,33 g/100 g para los granos “control”, entre 13,24 y 15,78 g/100 g para los granos-ATAH y entre 8,38 y 10,08 g/100 g para los granos-BTBH.

En general, no hubo un efecto significativo ($p > 0,05$) de las condiciones de secado ni de almacenamiento sobre los sólidos perdidos en el remojo, encontrándose en un intervalo de 8,42 a 10,77 g/100 g. No obstante, los granos no tratados con vapor ni secados (tratamiento 12) presentaron un contenido significativamente inferior ($p \leq 0,05$), principalmente en los granos “control” y en los almacenados a BTBH, aproximadamente 10

veces menor (Fig. 7). Por otra parte, la cantidad de sólidos perdidos en el remojo de los granos tratados con vapor pero no secados (tratamiento 13) resultó igual a la obtenida con los tratamientos con vapor-secado, a partir de lo cual se deduce que la elevada pérdida de sólidos se debió principalmente a la aplicación de vapor. Mientras que en los granos no tratados ni secados, resultó evidente el efecto de las condiciones de almacenamiento y se comprobó una vez más que las condiciones de alta temperatura y alta humedad relativa incrementan los sólidos perdidos en el remojo.

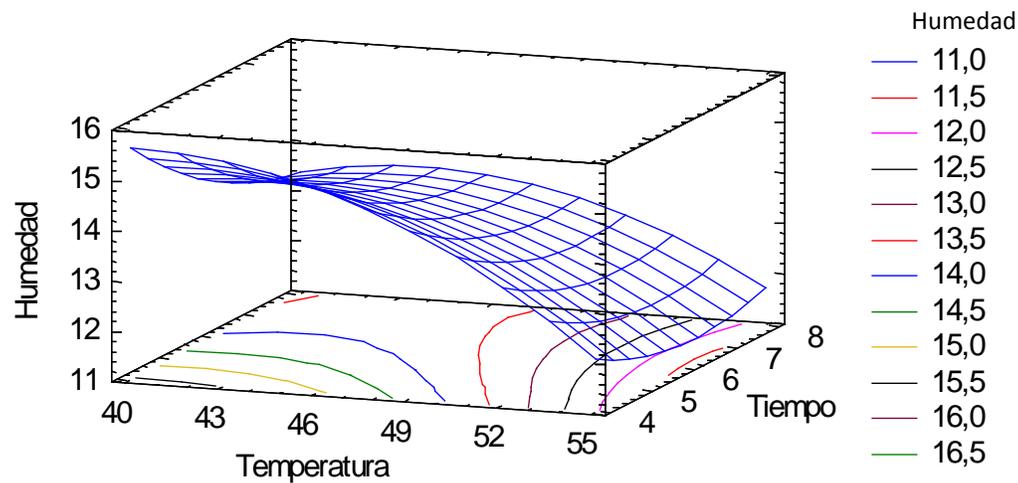
Affrifah y Chinnan (2006) obtuvieron resultados similares con los electrolitos perdidos en el remojo al aplicar tratamientos con vapor-secado a granos de una especie de frijol. En general, los granos tratados tuvieron una pérdida significativamente ($p \leq 0,05$) más elevada en comparación con los granos no tratados ni secados, y no hubo un efecto significativo ($p > 0,05$) de las condiciones de secado en los granos “control” y en los almacenados a alta temperatura y alta humedad relativa.

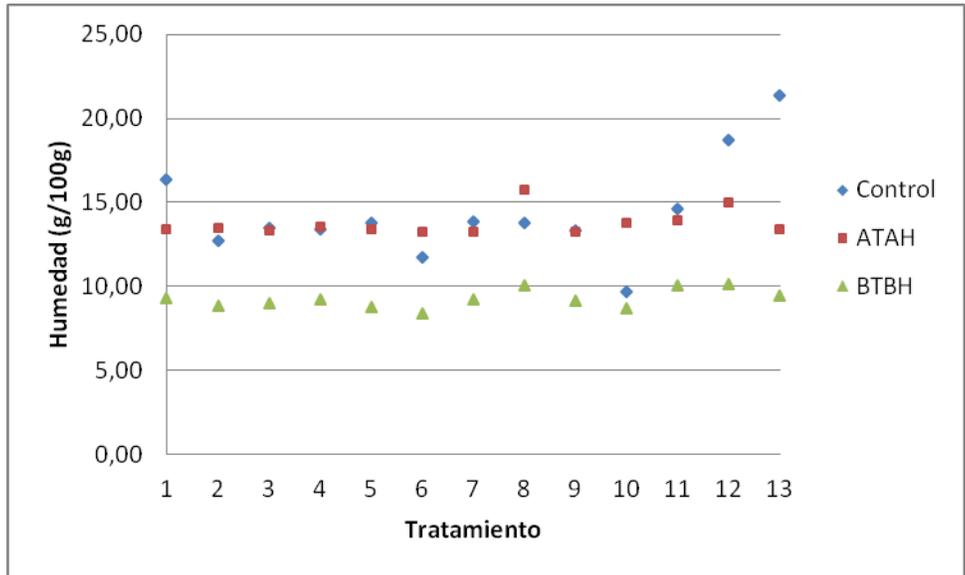
El incremento de los sólidos o electrolitos perdidos en el remojo por efecto del vapor pudo deberse al deterioro de la membrana plásmática, el cual ocurre a temperaturas superiores a 55 °C, de acuerdo con Thebud y Santarius (1982), perdiendo así su capacidad para regular el intercambio de diversos componentes entre el interior y el exterior de la célula. Adicionalmente, debido a que los granos se remojaron en agua destilada, por un principio osmótico, los electrolitos y sólidos en general fueron expulsados de las células cuyas membranas fueron afectadas.

En las muestras almacenadas a BTBH y ATAH no hubo un efecto significativo de las condiciones de secado sobre la capacidad de imbibición, mientras que en los granos “control” sí lo hubo. En este sentido, la temperatura y el tiempo de secado, su interacción y los efectos cuadráticos resultaron estadísticamente significativos ($p \leq 0,05$), como

Cuadro 2.- Resumen del ANOVA multifactorial para la humedad de los granos tratados con vapor y secados, antes del almacenamiento (control).

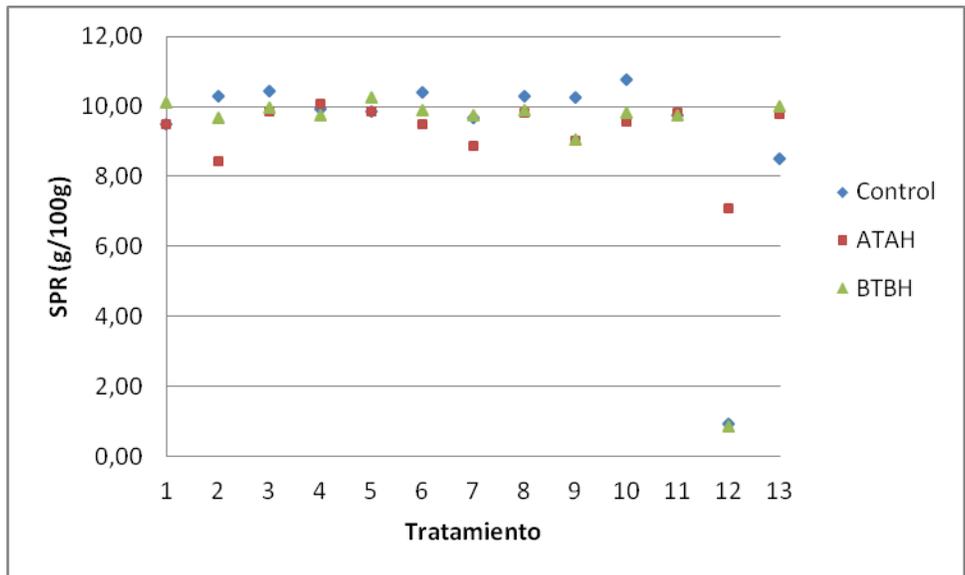
Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón- <i>F</i>	Valor- <i>p</i>
A:Temperatura de secado	13,848	1	13,848	218,99	0,005
B:Tiempo de secado	3,043	1	3,043	48,12	0,020
AA	4,693	1	4,693	74,22	0,013
AB	0,884	1	0,883	13,97	0,065
BB	1,036	1	1,036	16,38	0,056
Falta de ajuste	1,857	3	0,619	9,79	0,094
Error puro	0,126	2	0,063		
Total (corregido)	27,445	10			

**Figura 5.-** Superficie de respuesta para el efecto de la temperatura y el tiempo de secado sobre la humedad de los granos tratados con vapor, antes del almacenamiento (control).



ATAH: alta temperatura/alta humedad relativa. BTBH: baja temperatura/baja humedad relativa.

Figura 6.- Efecto de las condiciones de secado sobre la humedad de los granos tratados con vapor, antes (control) y después del almacenamiento por 5 semanas.



ATAH: alta temperatura/alta humedad relativa. BTBH: baja temperatura/baja humedad relativa.

Figura 7.- Efecto de las condiciones de secado sobre los sólidos perdidos en el remojo (SPR) de los granos tratados con vapor, antes (control) y después del almacenamiento por 5 semanas.

lo indica el análisis de varianza del Cuadro 3. De acuerdo a la superficie de respuesta generada (Fig. 8), el máximo valor (93,70 g/100 g) se alcanza al secar los granos a 58,1 °C por 8,1 h.

Affrifah y Chinnan (2006), luego de aplicar un tratamiento con vapor-secado, encontraron que la temperatura de secado tuvo un efecto lineal significativo sobre la capacidad de imbibición de los granos “control” y de los almacenados a alta temperatura y alta humedad relativa (42 °C y 80 % HR), mientras que en las muestras conservadas a baja temperaturas no presentó algún efecto significativo.

En general, la condición de almacenamiento tuvo un efecto estadísticamente significativo ($p \leq 0,05$) sobre la capacidad de imbibición, de acuerdo con el análisis de varianza del Cuadro 4. Las medias presentaron el siguiente orden: BTBH > “control” > ATAH, al analizarlas con la prueba de rango múltiple de Duncan, lo cual era de esperarse puesto que el almacenamiento a altas temperaturas y altas humedades relativas reducen la capacidad de imbibición de los granos.

Por otra parte, al comparar las muestras tratadas con vapor-secadas con la muestra no tratada con vapor ni secada y con la muestra solo tratada con vapor se pudo notar que la reducción de la capacidad de imbibición se debió principalmente a la aplicación de vapor, lo cual puede explicarse por un principio osmótico, puesto que este tratamiento también fue el principal responsable del incremento de los sólidos perdidos en el remojo. Al existir más sólidos o sales en el medio de remojo es menor o más lenta la absorción de líquido por parte de los granos. Estos resultados coinciden con los informados por Bellido *et al.* (2003) y por Affrifah y Chinnan (2006), quienes encontraron una disminución de la capacidad de imbibición luego de tratar térmicamente los granos.

En relación al efecto de los tratamientos con vapor-secado sobre el tiempo de cocción de

los granos, se tiene que no previnieron el endurecimiento de las muestras almacenadas a ATAH, puesto que la dureza de estas se incrementó en más del doble en comparación con los granos “control”, tal como se puede observar en la Fig. 9.

A partir del análisis de varianza mostrado en el Cuadro 5 se comprueba que el tratamiento térmico, bajo las diferentes condiciones de secado, no tuvo efecto significativo ($p > 0,05$) sobre el tiempo de cocción de los granos, a diferencia de la condición de almacenamiento que si lo tuvo ($p \leq 0,05$). En tal sentido, las muestras tratadas con vapor-secadas presentaron el mismo comportamiento de la muestra no tratada con vapor ni secada y de la muestra tratada con vapor.

Estos resultados difieren de los publicados por Molina *et al.* (1976) quienes sometieron granos de *P. vulgaris* a un tratamiento con vapor por 10, 20 y 30 min, sin secarlos posteriormente, encontrando que el tratamiento a menor tiempo redujo el endurecimiento de los granos almacenados a ATAH (25 °C/70 % HR).

De igual modo Affrifah y Chinnan (2006) lograron prevenir el endurecimiento de los granos de frijol aplicando vapor a 121 °C por 4 min en autoclave y luego deshidratándolos en un secador de bandejas bajo diferentes condiciones de temperatura, humedad del aire y tiempo. No obstante, los resultados concuerdan con lo documentado por Phlak *et al.* (1987) y por Rivera *et al.* (1989), quienes no encontraron una reducción o prevención del endurecimiento de *P. vulgaris* después de aplicar diferentes tratamientos de deshidratación. Las diferencias entre unos y otros resultados pudo deberse al contenido de humedad obtenido después del tratamiento térmico, puesto que Rivera *et al.* (1989) encontraron que los granos con humedad igual o superior a 13 g/100 g se endurecían al almacenarse a alta temperatura y alta humedad relativa, independientemente del pre-tratamiento

Cuadro 3.- Resumen del ANOVA multifactorial para la capacidad de imbibición de los granos tratados con vapor y secados, antes del almacenamiento (control).

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón- <i>F</i>	Valor- <i>P</i>
A:Temperatura de secado	83,833	1	83,833	535,22	0,002
B:Tiempo de secado	86,934	1	86,934	555,01	0,002
AA	3,276	1	3,276	20,92	0,045
AB	3,098	1	3,098	19,78	0,047
BB	25,902	1	25,902	165,36	0,006
Falta de ajuste	15,648	3	5,216	33,30	0,029
Error puro	0,313	2	0,157		
Total (corregido)	215,835	10			

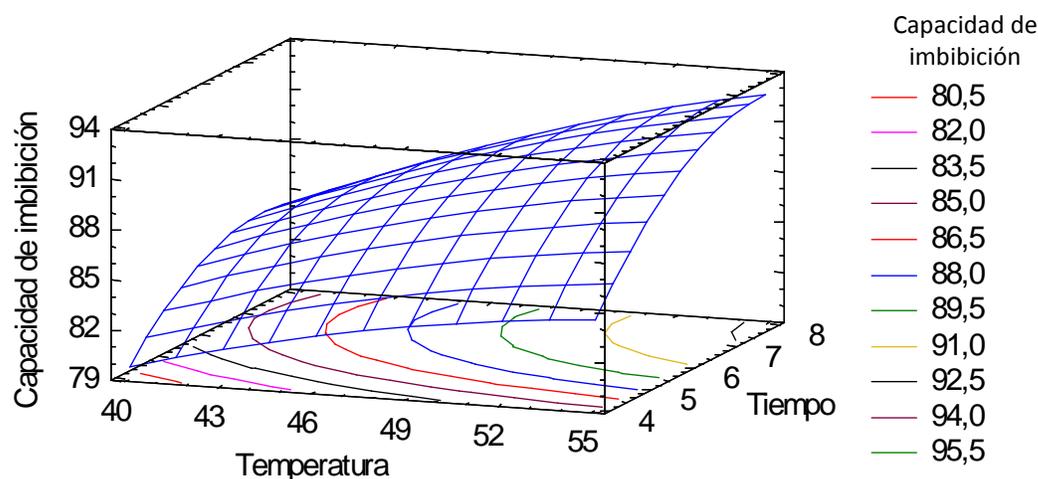
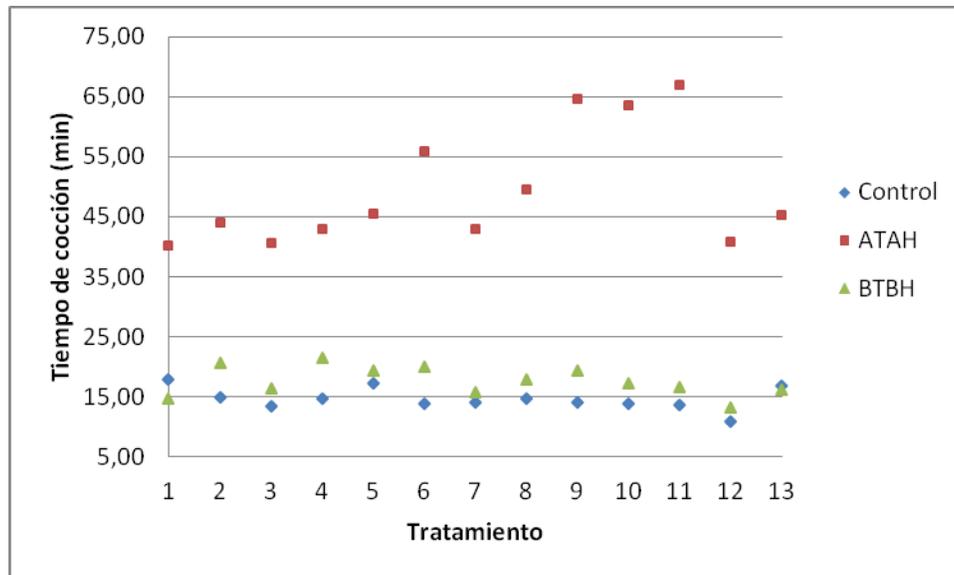


Figura 8.- Superficie de respuesta para el efecto de la temperatura y el tiempo de secado sobre la capacidad de imbibición de los granos tratados con vapor, antes del almacenamiento (control).

Cuadro 4.- Resumen del ANOVA multifactorial para la capacidad de imbibición de los granos tratados con vapor y secados.

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón- <i>F</i>	Valor- <i>P</i>
Efectos principales					
A:Condición almacenamiento	1072,140	2	536,072	28,23	0,000
B:Tratamiento	532,983	12	44,415	2,34	0,037
Residuos	455,717	24	18,988		
Total (corregido)	2060,840	38			



ATAH: alta temperatura/alta humedad relativa. BTBH: baja temperatura/baja humedad relativa.

Figura 9.- Efecto de las condiciones de secado sobre el tiempo de cocción de los granos tratados con vapor, antes (control) y después del almacenamiento por 5 semanas.

Cuadro 5.- Resumen del ANOVA multifactorial para el tiempo de cocción de los granos tratados con vapor y secados.

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón- <i>F</i>	Valor- <i>P</i>
Efectos principales					
A:Condición almacenamiento	9697,780	2	4848,890	139,83	0,000
B:Tratamiento	445,481	12	37,123	1,07	0,424
Residuos	832,231	24	34,676		
Total (corregido)	10975,500	38			

aplicado. En este estudio, la humedad promedio de los granos “control” resultó igual a 13,34 g/100 g, por lo que este factor pudo ser la causa principal del endurecimiento. Asimismo, Antunes y Sgarbieri (1979) afirman que la humedad de los granos debe ser inferior a 10 g/100 g para prevenir su endurecimiento durante el almacenamiento a alta temperatura y alta humedad relativa, por lo que se recomienda la evaluación de un pretratamiento de vaporización-secado que logre reducir la humedad de los granos por debajo de ese valor.

Además, es importante considerar la magnitud de la combinación alta temperatura/alta humedad relativa, puesto que Molina *et al.* (1976) utilizaron 25 °C/70 % HR, mientras que en esta investigación se usó 37 °C/75 % HR, condiciones más severas que aceleran el endurecimiento.

Por otra parte, cabe destacar que ni las condiciones de secado ni las de almacenamiento tuvieron efecto sobre la actividad de la peroxidasa soluble, la cual resultó nula en todas las muestras, a excepción de la no tratada con vapor ni secada. En esta última muestra la actividad de la peroxidasa soluble disminuyó significativamente ($p \leq 0,05$) en los granos almacenados a ATAH, y no hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los

granos “control” y los granos conservados a BTBH. En consecuencia, el endurecimiento de los granos en condiciones de alta temperatura y alta humedad relativa no depende de la actividad de la peroxidasa soluble en las primeras semanas de almacenamiento. Este resultado favorece la hipótesis del mecanismo múltiple, puesto que se ha propuesto que el endurecimiento de los granos contempla 2 componentes principales, uno reversible asociado al mecanismo de pectina-cación-fitato y el otro irreversible relacionado con el mecanismo de lignificación y de formación de puentes fenólicos entre los polisacáridos de las paredes celulares (Hincks y Stanley, 1986; del Valle y Stanley, 1995). El endurecimiento reversible ocurre primero, es el más rápido y de mayor alcance, y la inactivación de la peroxidasa no puede prevenirlo pues está relacionada con el endurecimiento irreversible.

Por otra parte, la completa inactivación de la peroxidasa soluble no asegura la inactivación de la fitasa, enzima clave en el mecanismo de la pectina-cación-fitato, puesto que aún con tratamientos térmicos a 95 °C por 32 min su actividad residual es significativa y podría generar el endurecimiento de los granos de *P. vulgaris* (Affrifah *et al.*, 2005).

En base a estos resultados se puede deducir además que la manera más sencilla de evitar el endurecimiento de los granos es almacenándolos en condiciones apropiadas de temperatura y de humedad relativa, por debajo de 25 °C y de 65 % HR, preferiblemente en silos o estructuras donde se puedan controlar estas variables a través del uso de un sistema de aireación.

CONCLUSIONES

La aplicación de vapor y posterior secado de los granos recién cosechados no previno su endurecimiento durante el almacenamiento a alta temperatura y alta humedad relativa, y este no dependió de la actividad de la peroxidasa soluble en las primeras semanas de almacenamiento; por lo que se puede inferir que los compuestos fenólicos y la enzima peroxidasa no son los únicos implicados en el mecanismo de endurecimiento de los granos de *Phaseolus vulgaris*, sino que depende además de otros componentes, por lo que se trata de un fenómeno complejo con múltiples reacciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Affrifah, Nicole S. and Chinnan, Manjeet S. 2006. The effect of drying conditions on the development of the hard-to-cook in steam-treated cowpeas. *International Journal of Food Science & Technology*. 41(8):867-877.
- Affrifah, Nicole S. Chinnan, Manjeet S. and Phillips, R. Dixon. 2005. Heat-moisture treatments of cowpea flour and their effects on phytase inactivation. *Journal of Food Science*. 70(2):E98-E103.
- Aguilera, J.M. and Rivera, J. 1990. Storage and handling of black beans. *Journal of Food Processing and Preservation*. 14(6):423-435.
- Aguilera, José M. and Rivera R. 1992. Hard-to-cook defect in black beans: hardening rates, water imbibition and multiple mechanism hypothesis. *Food Research International*. 25(2):101-108.
- Antunes, Pedro L. and Sgarbieri, Valdemiro C. 1979. Influence of time and conditions of storage on technological and nutritional properties of a dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) variety Rosinha G2. *Journal of Food Science*. 44(6):1703-1706.
- Bellido, G.G.; Arntfield, S.D.; Scanlon, M.G. and Cenkowski, S. 2003. The effect of micronization operational conditions on the physicochemical properties of navy beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Food Science*. 68(5):1731-1735.
- Bressani, R. 1989. Revisión sobre la calidad del grano de frijol. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 39(3):419-442.
- Casañas, Francesc; Pujolà, Montserrat; Romero del Castillo, Roser; Almirall, Antoni; Sánchez, Esther and Nuez, Fernando. 2006. Variability in some texture characteristics and chemical composition of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 86(14):2445-2449.
- da Silva, Luís César. 2005. Secagem de grãos. *Boletim Técnico: AG: 04/05*. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Campus de Alegre, Alegre, Espírito Santo, Brasil. 5 p.
- del Valle, J.M. and Stanley, D.W. 1995. Reversible e irreversible components of bean hardening. *Food Research International*. 28(5):455-463.
- Hincks, M.J. and Stanley, D.W. 1986. Multiple mechanisms of bean hardening. *International Journal of Food Science & Technology*. 21(6):731-750.
- Maurer, Giselle A.; Ozen, Banu F.; Mauer, Lisa J. and Nielsen, Suzanne. 2004. Analysis of hard-to-cook red and black common beans using Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 52(6):1470-1477.

- Melo, Pâmella de Carvalho; Devilla, Ivano Alessandro; Caetano, Jordana Moura, Reis, Vanesa Beny da Silva Xavier, Antunes, Arlindo Modesto e Santos Mateus Morais. 2016. Modelagem matemática das curvas de secagem de grãos de feijão carioca. *Agrária - Revista Brasileira de Ciências Agrárias*. 11(3):247-252.
- Molina, M.R.; Baten, M.A.; Gomez-Brenes, R.A.; King, K.W. and Bressani, R. 1976. Heat treatment: a process to control the development of the hard-to-cook phenomenon in black beans (*Phaseolus vulgaris*). *Journal of Food Science*. 41(3):661-666.
- Morais, Simone Janaína da Silva; Devilla, Ivano Alessandro; Ferreira, Daiane Assis e Teixeira, Itamar Rosa. 2013. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). *Revista Ciência Agronômica*. 44(3):455-463.
- Plhak, L.C.; Stanley, D.W.; Hohlberg, A.I. and Aguilera, J.M. 1987. Hard-to-cook defect in black beans - effect of pretreatment and storage condition on extractable phenol and peroxidase activity. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*. 20(5):378-382.
- Resende, Osvaldo; Corrêa, Paulo César; Goneli, André Luís Duarte; Botelho, Fernando Mendes e Rodrigues, Silvestre. 2008. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*. 10(1):17-26.
- Resende, Osvaldo; Corrêa, Paulo César; Goneli, André Luís Duarte e Cecon, Paulo Roberto. 2005. Forma, tamanho e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*. 7(1):15-24.
- Reyes-Moreno, Cuauhtémoc, Paredes-López, Octavio and Gonzalez, Elvira. 1993. Hard-to-cook phenomenon in common beans-a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 33(3):227-286.
- Reyes-Moreno, C.; Rouzaud-Sandez, O.; Milán-Carrillo, J.; Garzón-Tiznado, J.A. and Camacho-Hernández, L. 2001. Hard-to-cook tendency of chickpea (*Cicer arietinum* L) varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 81(10):1008-1012.
- Ribeiro, Nerinéia Dalfollo; Mambrin, Ritieli Baptista; Storck, Lindolfo; Prigol, Marina and Nogueira, Cristina Wayne. 2013. Combined selection for grain yield, cooking quality and minerals in the common bean. *Revista Ciência Agronômica*. 44(4):869-877.
- Rivera, Ana; Casquero, Pedro A.; Mayo, Sara; Almirall, Antonio; Plans, Marçal; Simó, Joan; Romero del Castillo, Roser and Casañas, Francesc. 2016. Culinary and sensory traits diversity in the Spanish core collection of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Spanish Journal of Agricultural Research*. 14(1):e0701. 9 p.
- Rivera, J.A.; Hohlberg, A.I.; Aguilera, J.M.; Plhak, L.C. and Stanley, D.W. 1989. Hard-to-cook defect in black beans-peroxidase characterization and effect of heat pretreatment and storage conditions on enzyme inactivation. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*. 22(3):270-275.
- Saha, Supradip; Singh, Gyanendra; Mahajan; V. and Gupta, H.S. 2009. Variability of nutritional and cooking quality in bean (*Phaseolus vulgaris* L) as a function of genotype. *Plant Foods for Human Nutrition*. 64(2):174-180.
- Thebud, Regina and Santarius, Kurt A. 1982. Effects of high-temperature stress on various biomembranes of leaf cells *in situ* and *in vitro*. *Plant Physiology*. 70(1):200-205.
- Yang, Jian Gang and Uchiyama, Takeo. 2000. Hydroxycinnamic acids and their dimers involved in the cessation of cell elongation in *Mentha* suspension culture. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. 64(8):1572-1579.