

Estudio de las cinéticas de pérdida de agua y absorción de aceite durante la fritura de arveja (*Pisum sativum* L.)

Study of the kinetics loss of water and oil absorption during the frying pea (*Pisum sativum* L.)

Lizeth Barrios Barrios, Oswaldo Osorio Mora* y Andrés Felipe Cerón Cárdenas

Universidad de Nariño, Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Grupo de Apoyo a la investigación y Desarrollo Agroalimentario (GAIDA). Pasto, Colombia. *Autor para correspondencia: osorio_oswaldo@udenar.edu.co

Rec.: 14.02.2015 Acep.: 25.06.2015

Resumen

La fritura es un proceso en el que se evidencia pérdida de humedad y ganancia de aceite en los productos. Cambios atribuidos a la temperatura del proceso y el tiempo de residencia del producto en aceite caliente. En este estudio se realizó la cinética de pérdida de humedad y absorción de aceite durante la fritura por inmersión de arveja (*Pisum sativum* L.) variedad Sureña. Se evaluó tres temperaturas 160, 180 y 200 °C, y tiempos de entre 0 y 8 min; la relación producto/aceite se mantuvo constante 1:6 (p/v). La cinética de absorción de aceite se estudió con un modelo exponencial, mientras que la pérdida de humedad se estudió con el modelo de Newton. Los modelos estudiados describen adecuadamente los dos fenómenos de transferencia de masa. Las constantes cinéticas calculadas a 160, 180 y 200 °C fueron: absorción de aceite (0.0084, 0.0088 y 0.0094 s⁻¹) y pérdida de humedad (0.0125, 0.0144 y 0.0194 s⁻¹) mientras que los valores de difusividad obtenidos fueron (0.1551 x 10⁻⁹, 0.1787 x 10⁻⁹ y 0.2371x 10⁻⁹ m²/s). Tanto la difusividad como los parámetros cinéticos presentan dependencia con la temperatura al evaluarlos, con la ecuación de Arrhenius se obtuvo la energía de activación 18.13 kJ/mol.

Palabras clave: Constantes cinéticas, difusividad, energía de activación, modelos matemáticos.

Abstract

Frying is a process in which moisture loss and gain of oil products is evidenced. Changes attributed to the process temperature and residence time of the product in hot oil. This study was conducted by, the kinetics of moisture loss and oil uptake during frying of pea (*Pisum sativum* L.) Southern variety. Was evaluated three temperatures, 160, 180 and 200 °C, and three times from 0 to 8 min; the product / oil ratio remained constant 1: 6 (w / v). The oil absorption kinetics was studied using an exponential model, while moisture loss was studied using the model of Newton. Studied models adequately describe both mass transfer phenomena. Kinetic constants calculated at 160, 180 and 200 °C were: oil absorption (0.0084, 0.0088 and 0.0094 s⁻¹) and moisture loss (0.0125, 0.0144 and 0.0194 s⁻¹) while diffusivity values obtained were (0.1551 x 10⁻⁹, 0.1787 x 10⁻⁹ and 0.2371x 10⁻⁹ m²/s). Both diffusivity and kinetic parameters exhibit temperature dependence when being evaluated by the Arrhenius equation was obtained, the activation energy of 18.13 kJ/mol.

Keywords: Constants kinetics, diffusivity, activation energy, mathematical models.

Introducción

La arveja (*Pisum sativum* L.), es uno de los principales cultivos comestibles en el mundo (Amarakoon *et al.*, 2012) ocupa el cuarto lugar en la producción mundial junto a la soja, maní y frijol (Villalobos *et al.*, 2013) es fuente de proteína con aminoácidos esenciales, hidratos de carbono complejos, fibra dietética y microelementos (Szymanowska *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011). La diversidad en Colombia es amplia, con un gran número de variedades que se han mejorado por rendimiento y por calidad del producto fresco o como materia prima para la agroindustria (Ligareto y Ospina, 2009). Las variedades más cultivadas son: Santa Isabel, Piquinegra, Guatecana, Sindamanoy, San Isidro, y Obonuco Andina. No obstante, en 2012, se lanzó la variedad sureña afirmando superioridad comercial y productividad (Díaz *et al.*, 2014).

Dentro de la transformación agroindustrial, la arveja en lata sometida a esterilización ha sido la principal estrategia para la generación de mayor valor agregado, limitando de alguna manera otras alternativas como lo puede ser la fritura; siendo la fritura uno de los procedimientos más populares para preparar alimentos (Alvis, Villada y Villada, 2008). La fritura se ha definido como la cocción en aceite o grasa caliente a temperaturas elevadas, donde el aceite actúa como transmisor del calor produciendo un calentamiento rápido y uniforme en el alimento (Kochhar & Gertz, 2004), durante el proceso se nota una clara pérdida de humedad, ganancia de aceite, desnaturalización de las proteínas, gelatinización de los almidones y cuantiosos cambios microestructurales en el interior del alimento (Alvis y Vélez, 2008). Cambios atribuidos a la humedad del alimento, la calidad del aceite, la temperatura del proceso y el tiempo de residencia del producto en el aceite caliente.

Actualmente, existen modelos empíricos para la predicción y la optimización, Banga, Balsa, Moles y Alonso (2003), quienes mencionan que el modelamiento matemático es una herramienta básica para el diseño y optimización de los procesos industriales, puesto que permite realizar la estimación de su desarrollo con anticipación, lo que conllevará a controlar la calidad y mejorar los procesos.

En este contexto, el objetivo de esta investigación fue realizar la cinética de absorción de aceite y pérdida de humedad durante la fritura de arveja (*Pisum sativum* L.) variedad Sureña, determinando parámetros como (K, Def y Ea).

Materiales y métodos

Localización. La investigación se realizó en los laboratorios de calidad y conservación de

alimentos de la Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad de Nariño sede Torobajo, Pasto (Nariño), localizada a 2527 m.s.n.m., temperatura promedio 14 °C y una humedad relativa de 70%.

Materia prima. Se utilizó semillas de arvejas (*Pisum sativum* L.) de la variedad Sureña (semilla verde, hilum negro, lisa), el material se recolectó al quinto mes de establecido el cultivo en la granja del Centro Internacional de Producción Limpia LOPE, Sena Regional Nariño, ubicado a 2650 m.s.n.m., temperatura promedio 13 °C y precipitación promedio anual de 700 mm, condiciones favorables para el cultivo. Posteriormente el material fue caracterizado a nivel químico proximal.

Proceso de fritura. Cada unidad experimental se constituyó por 100 g de arveja, el proceso se realizó en batch, se empleó una freidora de inmersión de capacidad 4 litros (Premier Ed-2891), con termóstato para controlar la temperatura; se empleó aceite 100 % vegetal industrial, cero colesterol con punto de humo de 230 °C, adicionalmente se adaptó al freidor una termocupla tipo K con bulbo de 3 mm para registro de la temperatura a lo largo del tiempo de fritura.

Las temperaturas a evaluar fueron: 160, 180 y 200 °C, por tiempos de entre 0 y 5 min la relación producto/aceite se mantuvo constante 1:6 (p/v).

Determinación contenido de aceite. Se procesó 2.00 ± 0.001 g de cada tratamiento, se utilizó el Extractor Soxhlet, empleando como solvente éter etílico al 99.8%, con reflujo de 8 horas, los ensayos se hicieron cinco veces. La recuperación del solvente se hizo empleando un evaporador rotatorio (Eyela oil bath osb-2000). Posteriormente, el extracto se secó por 30 minutos a 60 ± 2 °C, hasta eliminar el solvente residual, se enfrió y se pesó; la cantidad se expresó en base seca.

Determinación humedad. Se pesó 2.00 ± 0.001 g de cada tratamiento, aparte de ello se pesó una capsula de porcelana previamente seca al calor. Se calentó a 100 ± 0.1 °C en un horno eléctrico (Thermolab dies), por un tiempo de 24 horas hasta lograr un peso constante. Se enfrió en un desecador y se pesó, los resultados se expresaron en base seca.

Determinación constante de velocidad de absorción de aceite. Se determinaron mediante un modelo exponencial (ecuación 1) expuesto por Moyano y Pedreschi (2006).

$$C_{(t)} = C_{\infty} (1 - \exp^{-k t}) \quad (1)$$

Dónde: C (t): contenido de aceite en el equilibrio a tiempo t, g de aceite/g de sólido seco; C_∞: contenido de aceite en el equilibrio a tiempo infinito, g

de aceite/g de sólido seco; K: constante de velocidad de absorción de aceite, min^{-1} ; t: tiempo de adsorción de aceite, min. Los parámetros cinéticos C_{∞} y K se obtuvieron a partir de los datos experimentales mediante regresión no lineal.

Determinación constante de velocidad de pérdida de humedad. Se determinó mediante el modelo de Newton (ecuación 2) expuesto por Da Rocha *et al.*, (2012) y Montes *et al.*, (2008).

$$MR = \exp(-k t) \quad (2)$$

Dónde: MR: se describe en la (3); K: constante de velocidad de pérdida de agua, s^{-1} ; t: tiempo de pérdida de agua en la fritura, s. Los parámetros cinéticos K se obtuvieron a partir de los datos experimentales mediante regresión no lineal.

$$MR = \frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{wo} - X_{we}} \quad (3)$$

Dónde: X_{wt} : Contenido de agua al tiempo t (g de agua/g de sólido seco); X_{wo} : contenido de agua en el equilibrio (g de agua/g de sólido seco) y X_{we} : Contenido de agua (g de agua/g de sólido seco)

Estudio de la transferencia de agua como modelo difusivo. Se utilizó la metodología descrita por Melquíades *et al.*, (2009) a partir de la segunda Ley de Fick, ecuación de difusión, con geometría de un cilindro (ecuación 4).

$$\frac{m - m_s}{m_o - m_s} = \frac{4}{5.783} \exp\left(-\frac{5.783 \text{ Def } t}{R^2}\right) \quad (4)$$

Dónde: Def: coeficiente de difusión de agua en el grano; t: tiempo; m_o : humedad inicial; m_s : humedad en equilibrio y R: radio de la semilla equivalente.

En el mismo sentido, se determinó la energía de activación (Ea), de la operación de fritura por inmersión a partir del coeficiente de difusión que se ajusta a la ecuación de Arrhenius debido a su dependencia con la temperatura (Melquíades *et al.*, 2009) ecuación 5.

$$Def = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

Dónde: D_o : factor pre-exponencial; Ea: energía de activación (kJ/mol) y R: constante de los gases (8.314 J/ (g mol K)).

Análisis de resultados. Todos los resultados se expresaron como media más o menos la desviación estándar. Los gráficos fueron realizados con ayuda del programa Sigma Plot 10 (SPSS, USA). La bondad de ajuste del modelo se evaluó con los parámetros R^2 (coeficiente de determinación), % E (error porcentual promedio) ecuaciones 6 y

RMSE (raíz cuadrada del error medio cuadrático) ecuación 7.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|C_{cal} - C_{exp}|}{C_{exp}}}{n} \cdot 100 \quad (6)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (C_{cal} - C_{exp})^2}{n} \right]^{0.5} \quad (7)$$

Dónde: C_{cal} : valor calculado; C_{exp} : valor experimental; n: número de determinaciones. Según Brousse *et al.*, (2012) un buen ajuste es indicado por valores pequeños de RMSE, $R^2 > 0.85$ y E % < 10 %.

Resultados y discusión

Análisis proximal

En la Tabla 1, se expone la composición proximal de la arveja en esto fresco y bajo las diferentes condiciones de fritura por inmersión evaluadas. Conforme aumento la temperatura la proteína y ceniza aumentaron debido a la pérdida de humedad de las semillas, ocasionando una concentración de los solutos. Sin embargo, solo se alcanzó valores de proteína de entre 14 y 16 %, inferior a los valores de la arveja en estado seco 24% (INCAP, 2012), debido a que simultáneamente los espacios que deja el agua evaporada son ocupados por el aceite (Rodríguez, *et al.*, 2013), ocasionando un aumento en el contenido graso de las semillas, lo cual modifica nuevamente la base de cálculo de los solutos, fenómeno similar reportaron Villamizar *et al.*, (2011).

Tabla 1. Análisis químico proximal arveja (*Pisum sativum* L.) (g/100g).

Componente	Arveja fresca	Arveja sometida a fritura		
		160 °C	180 °C	200 °C
Proteína	7.99 ± 0,77	14.77 ± 1.02	15.51 ± 1.40	16.24 ± 1,77
Humedad	63.5 ± 2,90	1.36 ± 0.08	1.08 ± 0,02	1.03 ± 0.05
Grasa	0.57 ± 0.04	33.9 ± 1.18	30.9 ± 1.23	27.8 ± 1,49
Ceniza	1.10 ± 0,071	1.99 ± 0.10	2.09 ± 0.09	2.19 ± 0.21

Valores promedio (n=3) ± desviación estándar

Cinética de absorción de aceite

En la figura 1, se muestran los comportamientos cinéticos de la absorción de aceite a diferentes temperaturas conforme transcurre el tiempo. Evidenciando mayor velocidad de absorción al comienzo de la operación, para posteriormente disminuir lentamente hasta alcanzar un valor de equilibrio. Según Marín *et al.*, (2006) y Villada,

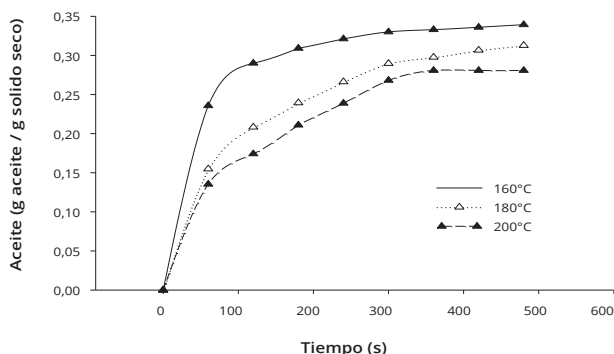


Figura 1. Cinética absorción de aceite

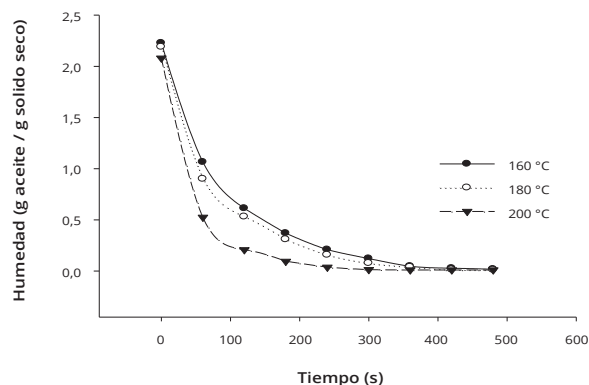


Figura 2. Cinética de pérdida de humedad

et al., (2009) este fenómeno se debe a que todos los espacios intercelulares o intracelulares quedan saturados con aceite conforme transcurre el tiempo.

Respecto al efecto de la temperatura, se evidenciaron reducciones en la absorción de aceite conforme se incrementó. Siendo la fritura a 160 °C la que presentó el mayor valor de absorción 0.343 g de aceite / g sólido seco, para disminuir en un 9.621 % a 180 °C y 18.367 % a 200 °C, concluyendo que a mayor temperatura menor es la absorción de aceite en el producto, Moyano y Pedreschi, (2006) reportan conclusión similar.

Cinética pérdida de humedad

En la figura 2, se presenta el comportamiento cinético de pérdida de humedad en función del tiempo, para las temperaturas 160, 180 y 200 °C. A mayor temperatura mayor es la pérdida de humedad, la arveja frita a 200 °C llega a una humedad en equilibrio en 300 segundos mien-

tras que a temperaturas de 160 °C se demora 420 segundos y para 180 °C un tiempo de 360 segundos, a medida que la temperatura de fritura se aumentó de 160 a 200 °C, el contenido de humedad de equilibrio disminuyó desde 0.0136 hasta 0.0103 g de agua / g sólido seco.

Las constantes cinéticas K para absorción de aceite y pérdida de humedad se indican en las tablas 2 y 3 respectivamente, donde las constantes aumentan a medida que aumenta la temperatura, datos similares fueron reportados por Troncoso y Predreschi (2009), y Moyano & Predreschi (2006), durante la fritura de papa pre-tratada, fritura de papa al vacío, y chips a base de harina de garbanzo. La bondad de ajuste permitió evaluar el modelo utilizado, modelo exponencial para absorción de aceite el cual fue bueno ya que se obtuvo errores desde 3.053 hasta 10.201 % lo cual es relativamente bajo, caso contrario para el modelo de Newton utilizado en pérdida de humedad donde se obtuvieron errores mayores desde 7.631 hasta 13.844 %.

Tabla 2. Parámetros cinéticos y bondad de ajuste del modelo exponencial.

Temperatura °C	*C _(∞) (g de aceite/g sólido seco)	*K (s ⁻¹) x 10 ⁻³	R ²	Bondad de ajuste	
				RMSE (x 10 ⁻⁶)	E %
160	0.343	8.40 ± 0.83	0.961	4.25589	10.201
180	0.313	8.80 ± 0.77	0.986	0.00007	3.053
200	0.281	9.40 ± 0.81	0.950	0.00188	4.242

Valores promedio (n=5) ± desviación estándar; K: constantes cinéticas de adsorción de agua y absorción de aceite; R²: coeficiente de determinación. RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático. E %: error porcentual promedio.

Tabla 3. Parámetros cinéticos y bondad de ajuste del modelo Newton.

Temperatura °C	* (g de agua/g sólido seco)	*K (s ⁻¹) x 10 ⁻²	R ²	Bondad de ajuste	
				RMSE (x 10 ⁻⁵)	E %
160	0.0136	1.25 ± 0.11	0.978	6.0135	13.844
180	0.0108	1.44 ± 0.08	0.960	0.6909	10.152
200	0.0103	1.94 ± 0.15	0.977	0.0004	7.631

*Valores promedio (n=5) ± desviación estándar; K: constantes cinéticas de adsorción de agua y absorción de aceite; R²: coeficiente de determinación. RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático. E %: error porcentual promedio.

En la tabla 4, se indican los valores de difusividad efectiva (Def) para cada temperatura, la cual evidencia la dependencia con la temperatura de fritura. Los valores encontrados de difusividad efectiva, se encuentran dentro del intervalo general de 10^{-9} y 10^{-11} para deshidratación de alimentos Sacilik y Elicin (2006). Al comparar los tratamientos, se evidencian valores de difusividad mayores a temperaturas más elevadas, debido a que la tasa de pérdida de humedad se incrementa a una mayor temperatura de fritura, ya que incrementa la tasa de evaporación Pedreschi *et al.*, (2006), resultados similares se obtuvieron en papa, Troncoso y Pedreschi (2009).

Tabla 4. Valores de difusividad efectiva a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	*Def (m ² /s) x 10 ⁹
160	0.155 ± 0.0121
180	0.179 ± 0.0159
200	0.237 ± 0.0253

*Valores promedio (n=5) ± desviación estándar

Se determinó la energía de activación a partir de la pendiente de la gráfica de Arrhenius (figura 3). La energía de activación representa la energía requerida para iniciar la difusión de la humedad y el aceite durante la fritura según Montes, *et al.*, (2008), en este estudio la energía de activación obtenida es de 18.613 kJ/mol, valores similares reporto Troncoso y Pedreschi (2009), el cual fue de 23.5 KJ/mol para la fritura de papa.

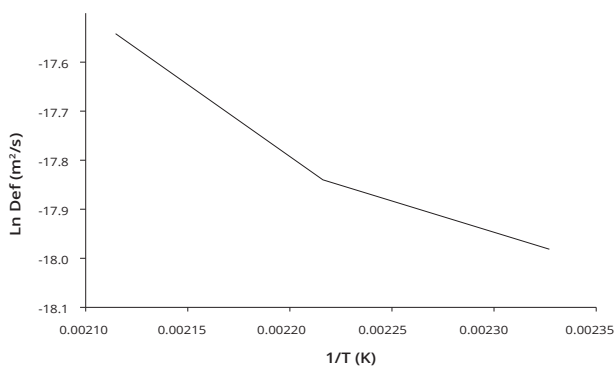


Figura 3. Gráfico de Arrhenius, $y = -2238.8x - 12.841$ $R^2 = 0.948$.

Conclusiones

El contenido de humedad y absorción de aceite durante la fritura, presenta dependencia con la temperatura, obteniéndose los valores más bajos a temperaturas más altas.

El modelo exponencial utilizado para absorción de aceite, obtuvo un buen ajuste con un porcentaje de error promedio de 5.8%.

Referencias

- Alvis. A. & Vélez. C. (2008). Modelado del Proceso de Fritura del Ñame (*Dioscorea alata*) mediante Mediciones reológicas usando la metodología de superficie de respuesta. *Información tecnológica*, 19 (5), 11-18.
- Amarakoon. D. Thavarajah. D. McPhee. K. & Thavarajah. P. (2012). Iron-, zinc and magnesium-rich field peas (*Pisum sativum* L.) with naturally low phytic acid: A potential food-based solution to global micronutrient malnutrition. *J Food Compos Anal*, 27(1), 8-13. doi: 10.1016/j.jfca.2012.05.007.
- Banga. J. Balsa-Canto. E. Moles. C. & Alonso. A. (2003). Improving food processing using modern optimization methods. *Trends Food Sci Tech*, 14 (4), 131-144. doi: 10.1016/S0924-2244(03)00048-7.
- Brousse. M. Nieto. A. Linares. A & Vergara. M. (2012). Cinética de adsorción de agua en purés deshidratados de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), *Rev Ven Cien Tec Alim*, 3 (1), 80-96.
- Da Rocha. R. Melo. E. Corbín. J. Berbert. P. Donzeles. S. Tabar. J. (2012). Cinética del secado de tomillo. *Rev Bras Eng Agr Amb*, 16(6), 675-683.
- Díaz. W. Cerón. A. Osorio. O. Mejía. D. (2014). Efecto de la Humedad en Propiedades Físicas de Semillas de Arveja (*Pisum sativum* L.). *Rev Fac Nac Agro Med*, 67(2), 579-581.
- Kochhar. S. & Gertz. C. (2004). New theoretical and practical aspects of the frying process. *Eur J Lipid Sci Tech*, 106(1), 722-727. doi: 10.1002/ejlt.200400996.
- Ligarreto. G. & Ospina. A. (2009). Análisis de parámetros heredables asociados al rendimiento y precocidad en arveja voluble (*Pisum sativum* L.) tipo Santa Isabel. *Agron Col*, 27(3), 333-339.
- Marín. B. Lemus. M. Flores. M. & Vega. G. (2006). La rehidratación de alimentos deshidratados. *Rev Chil Nut*, 33 (3), 527-538.
- Melquiades. Y. López. C. & Rosas. M. (2009). Estudio de la cinética de rehidratación de zanahoria (*Daucus Carota*) deshidratadas, *Información Tecnológica*, 20(3), 65-72.
- Montes. E. Gallo. R. Andrade. R. Pérez. O. Marimon. J. & Meza. I. (2008). Modelado de la cinética de secado de ñame (*Dioscorea rotundata*) en capa delgada. *Ingeniería e Investigación*, 28 (2), 45-52.
- Moyano. P. & Pedreschi. F. (2006). Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect of pre-treatments. *LWT, Food Sci Technol Res*, 39(3), 285-291. doi: 10.1016/j.lwt.2005.01.010.
- Pedreschi. F. Moyano. P. Santis. N. & Pedreschi. R. (2006). Physical properties of pre-treated potato chips. *J Food Eng*, 79(4), 1474-1482. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.04.029.
- Rodriguez. G. Zuluaga. C. Puerta. L. & Ruiz. L. (2013). Evaluación de parámetros fisicoquímicos en el proceso de fritura de banano osmodeshidratado. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11 (1), 123-129.
- Sacilik. K. & Elicin. A. (2006). The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *J Food Eng*, 73(3), 281-289. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.03.024.
- Szymanowska. U. Jakubczyk. A. Baraniak. B. & Kur. A. (2009). Characterization of lipoxygenase from pea seeds (*Pisum sativum* var. *Telephone* L.).

- Food Chem*, 116(4), 906–910. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.03.045.
- Troncoso. E. & Predreschi. F. (2009). Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *LWT - Food Sci Technol Res*, 42(6), 1164–1173. doi:10.1016/j.lwt.2009.01.008.
- Villada. D. Villada. H. & Mosquera. A. (2009). Evaluación del efecto de la deshidratación osmótica y fritura en dos variedades de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en la producción de chips. *Dyna*, 76 (160), 131-138.
- Villamizar. R. Quiceno. M. & Giraldo. G. (2011). Comparación de la fritura al vacío y atmosférica en la obtención de pasabocas de mango (*Mangifera indica* L.). *Temas agrarios*, 16(1), 64-74.
- Villalobos. M. Patel. A. Orsat. V. Singh. J. & Lefsrud. M. (2013). Fatty acid profiling of the seed oils of some varieties of field peas (*Pisum sativum*) by RP-LC/ESI-MS/MS: Towards the development of an oilseed pea. *Food Chem*, 139(1-4), 986-993. doi: 10.1016/j.foodchem.2012.12.052.
- Wang. S. Sharp. P. & Copeland. L. (2011). Structural and functional properties of starches from field peas. *Food Chem*, 126(4), 1546-1552. doi: 10.1016/j.foodchem.2010.11.154.