

CAMBIOS EN PROPIEDADES MECÁNICAS DURANTE LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE PITAHAYA AMARILLA

CHANGES IN MECHANICAL PROPERTIES DURING OSMOTIC DEHYDRATION OF YELLOW PITAHAYA

MUDANÇAS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DURANTE A DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA DE PITAHAYA AMARELA

ALFREDO ADOLFO AYALA-APONTE¹, YURI LEITON-RAMIREZ², LILIANA SERNA-COCK³

RESUMEN

Las frutas como la pitahaya amarilla presentan cambios en sus propiedades mecánicas durante la deshidratación osmótica (DO). El conocimiento de estas propiedades mecánicas es útil para el análisis de la calidad y/o estabilidad de los alimentos. Se evaluó la influencia del tiempo de deshidratación osmótica, el nivel de presión (presión atmosférica y pulso de vacío) y la concentración de sacarosa de la solución osmótica (SO) (45 y 65°Brix) sobre propiedades mecánicas de rodajas de pitahaya. El pulso de vacío fue de 5 kPa durante 5 min. Las muestras frescas y deshidratadas fueron sometidas a pruebas de compresión uniaxial hasta la ruptura; se evaluaron 3 parámetros mecánicos (esfuerzo de fractura, deformación de fractura y módulo de elasticidad). Los resultados mostraron que el esfuerzo de fractura y el módulo de elasticidad disminuyeron significativamente con el tiempo de DO y con la aplicación del pulso de vacío, mientras que se incrementaron con el aumento de concentración de sacarosa. La deformación de fractura se incre-

Recibido para evaluación: 29 de Noviembre de 2016. **Aprobado para publicación:** 1 de Marzo de 2017.

- 1 Universidad del Valle, ingeniería de alimentos, Grupo de Investigación en Procesos Agroindustriales (GIPA). Ph.D Ciencia y Tecnología de Alimentos. Cali, Colombia.
- 2 Universidad del Valle, ingeniería de alimentos, Grupo de Investigación en Procesos Agroindustriales (GIPAB). M.Sc ingeniería de alimentos. Cali, Colombia.
- 3 Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Facultad de Ingeniería y Administración, Grupo de investigación en bacterias ácido lácticas y sus aplicaciones biotecnológicas industriales. Ph.D Ingeniería de Alimentos. Palmira, Colombia.

Correspondencia: alfredo.ayala@correounivalle.edu.co

mentó con el tiempo de DO y con el pulso de vacío. Estos resultados indican que la pitahaya amarilla retiene mayor firmeza con presión atmosférica y con 65°Brix respecto a los tratados con aplicación del pulso de vacío.

ABSTRACT

Fruits such as yellow pitahaya exhibit changes in their mechanical properties during osmotic dehydration (OD). The knowledge of these mechanical properties is useful for the analysis of the quality and/or stability of the food. There was evaluated the influence of the time of osmotic dehydration, the level of pressure (atmospheric pressure and vacuum pulse) and the sucrose concentration of the osmotic solution (SO) (45 and 65°Brix) on the mechanical properties of slices of pitahaya. The vacuum pulse was 5 kPa for 5 min. Fresh and dehydrated samples were subjected to uniaxial compression tests until rupture; Three mechanical parameters were evaluated (fracture stress, fracture strain and modulus of elasticity). The results showed that the fracture stress and modulus of elasticity decreased significantly with OD time and vacuum pulse application, while increasing with increasing sucrose concentration. The fracture strain was increased with the OD time and with the vacuum pulse. These results indicate that the yellow pitahaya retains more firmness with atmospheric pressure and with 65°Brix with respect to the treatments with application of the empty pulse.

PALABRAS CLAVE:

Pulso de vacío, Esfuerzo de fractura, Deformación de fractura, Módulo de elasticidad

KEY WORDS:

Vacuum pulse, Fracture stress, Fracture strain, Modulus of elasticity

RESUMO

Frutas como fruto amarelo dragão tem mudanças em suas propriedades mecânicas durante a desidratação osmótica (DO). O conhecimento destas propriedades mecânicas é útil para a análise da qualidade e/ou a estabilidade dos alimentos. Assim, a influência do tempo de desidratação osmótica, o nível de pressão (pressão atmosférica e de vácuo do pulso) e a concentração de sacarose da solução osmótica (SO) (45 e 65°Brix) nas propriedades mecânicas foi avaliada fatias pitaiaias. O pulso de vácuo foi de 5 kPa durante 5 min. amostras frescas e secas foram testadas para a compressão uniaxial à ruptura; Foram avaliadas 3 parâmetros mecânicos (de resistência à fratura, fratura e módulo de deformação). Os resultados mostraram que a resistência à fratura e módulo de elasticidade diminuído significativamente com o tempo de DO e a aplicação de impulsos de vácuo, enquanto que aumentou com o aumento da concentração de sacarose. Fratura deformação aumentou com o tempo e com DO e pulso vácuo. Estes resultados indicam que a fruta do dragão amarelo retém mais firmemente com a pressão atmosférica e 65 ° Brix em comparação com os tratados com aplicação de impulso de vácuo.

PALAVRAS-CHAVE:

Pulso de vácuo, Esforço da fratura, Deformação da fratura, Módulo de elasticidad

INTRODUCCIÓN

La deshidratación osmótica (DO) es una técnica de conservación ampliamente usada para obtener productos semideshidratados [1, 2, 3]. Su mayor aplicación es como pretratamiento a otros procesos de transformación para obtener variedades de alimentos conservando propiedades nutricionales, sen-

soriales y funcionales [2]. Esta técnica consiste en la extracción de agua de un alimento que está sumergido en una solución osmótica (SO) hipertónica, por un tiempo y temperatura específicos [4]. La concentración de los agentes osmóticos es un factor que afecta el proceso [5]. Con la DO se pueden alcanzar pérdidas de agua entre 50 y 60% con respecto al peso inicial, dependiendo de la matriz celular [6]. En general, la deshidratación osmótica se realiza a presión atmosférica (DOPA), aunque se ha evidenciado en varios estudios que la aplicación de pulsos de vacío (DOPV) o impregnación a vacío en un tiempo corto ayuda a acelerar la transferencia de masa (pérdida de agua y ganancia de solutos) y mejorar la calidad de varios alimentos en términos de características fisicoquímicas, nutricionales y sensoriales [7, 3, 8]. La impregnación a vacío consiste en sustituir el gas y el líquido de los poros internos del producto por el líquido externo (solución osmótica).

Durante el proceso de DO, las reacciones químicas, físicas y biológicas que deterioran los alimentos se reducen considerablemente; por lo tanto, se extiende la vida útil de los productos alimenticios [6]. Estos fenómenos provocan modificaciones en las propiedades macroscópicas del vegetal, como cambios en las propiedades mecánicas, que están relacionados directamente con los cambios texturales del producto [9, 10].

A nivel macroscópico, los alimentos presentan un comportamiento viscoelástico; es decir, bajo condiciones de carga durante un tiempo de aplicación, se pueden comportar como un sólido, un líquido y, más frecuentemente, como una combinación de los dos [11]. Los cambios en las propiedades mecánicas pueden incrementar o disminuir la firmeza dependiendo de las condiciones de proceso y de las características del producto; por consiguiente estos cambios relacionados con las propiedades mecánicas de las frutas deben ser controlados, teniendo en cuenta que inciden en las características sensoriales y por lo tanto en la calidad y aceptación por el consumidor [12, 13].

Para estudiar el comportamiento mecánico de los alimentos se utiliza ampliamente la prueba de compresión uniaxial entre dos placas paralelas; se aplica una fuerza necesaria para causar una deformación dada o la ruptura de la muestra. La respuesta mecánica de los materiales biológicos depende de la carga y el tiempo de aplicación [14].

La pitahaya amarilla (*Selenicereus megalanthus*) se considera un fruto exótico, con gran aceptación en el

mercado nacional e internacional debido a su agradable sabor y a su atractiva forma y color. Se comercializa principalmente en fresco, siendo un limitante para la apertura de nuevos mercados y generación de valor agregado [15]. Por consiguiente la DO es una alternativa de interés como método de conservación y de procesamiento mínimo de la pitahaya amarilla. Sin embargo, por tener una textura blanda, es de interés estudiar sus propiedades mecánicas durante la deshidratación osmótica.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia del tiempo de DO, el nivel de presión de trabajo y la concentración de la SO usando sacarosa, sobre propiedades mecánicas de muestras de pitahaya, empleando la prueba de compresión uniaxial.

MÉTODO

Se emplearon pitahayas amarillas con grado de madurez 3 (16-18°Brix), de acuerdo a la NTC 3554 [16], las frutas se lavaron con agua potable y se higienizaron con agua clorada (200 $\mu\text{g}.\text{L}^{-1}$).

Deshidratación osmótica

Para el proceso de DO a presión atmosférica (DOPA) se prepararon 600 mL para cada solución osmótica de sacarosa grado alimentario a 45 y 65°Brix (p/p) en agua destilada. Se utilizó sacarosa como soluto debido a su amplio uso en el proceso de deshidratación de frutas [17, 18, 13, 19]. Las rodajas de pitahayas (5 mm de espesor y 30 mm de diámetro) se sumergieron en cada SO. Para evitar cambios en la concentración de la SO se empleó una relación fruta-SO en peso de 1:20 [20] para evitar una reducción de la fuerza impulsora durante el proceso [21]. La solución osmótica se mantuvo a $28,2 \pm 0,4^\circ\text{C}$ y se agitó permanentemente a 500 rpm mediante un agitador mecánico (Kika Labor Technik Pol Col, USA) para evitar el fenómeno de encostramiento. A distintos tiempos de DO (0, 30, 60, 120 y 240 min) se retiraron muestras de las soluciones osmóticas para determinar el contenido de humedad, °Brix, y propiedades mecánicas. Para el proceso de pulso de vacío (DOPV), a las muestras sumergidas en la SO se les aplicó un pulso de vacío de 5 kPa durante 5 min [22] del proceso, empleando un equipo de vacío (CENTRICOL S.A.Col); después del pulso se restituyó la presión atmosférica y el proceso continuo igual al de la presión atmosférica.

te $0,2780 \pm 0,020$, $0,289 \pm 0,011$, $0,2975 \pm 0,009$, $0,311 \pm 0,008$ ($^{\circ}$ Brix). Similar comportamiento reportaron Ayala *et al.*, [4] en la pérdida de humedad y ganancia de SS con el incremento de la concentración osmótica en la DO de pitahaya entre 55 y 65 $^{\circ}$ Brix, mientras que con el factor presión no fue significativo al final de la DO (240 min).

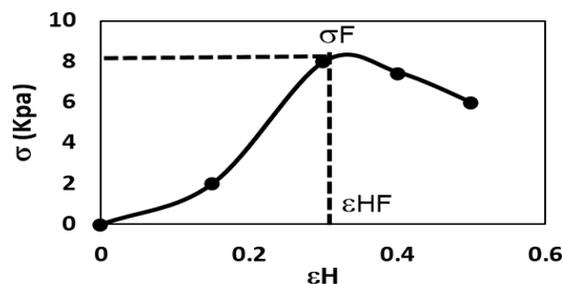
Estas mayores pérdidas de humedad y ganancia de solutos con el incremento de la concentración, se deben a la difusión de agua del medio diluido a la SO (solución hipertónica) a través de una membrana semi-permeable, esta fuerza impulsora es el gradiente de concentración entre la solución osmótica y la fase líquida del producto, siendo más dinámica a mayor concentraciones de sacarosa en la SO. Similar comportamiento se presentaron en otras frutas como el carambolo [25], el grosellero de la India [26], el yacón [27], nopal [22] y piña [28].

Las cinéticas de pérdida de humedad y ganancia de sólidos con la aplicación de vacío, se debe al mecanismo hidrodinámico que se evidencia en el inicio del proceso osmótico. Con la aplicación de las condiciones de vacío, el gas ocluido en los espacios intercelulares de los tejidos vegetales se retira y cuando la condición de la presión atmosférica se restablece, los poros del alimento se rellenan por la solución osmótica [3], similar comportamiento se presentó en alimentos como la higuera [29], tomate [3], calabaza [30] y yacón [27].

Propiedades mecánicas

En la figura 2 se presenta una curva típica experimental de esfuerzo-deformación obtenida de las pruebas de compresión uniaxial de rodajas de pitahaya. Inicialmente se observa en la figura una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, siendo la pendiente el

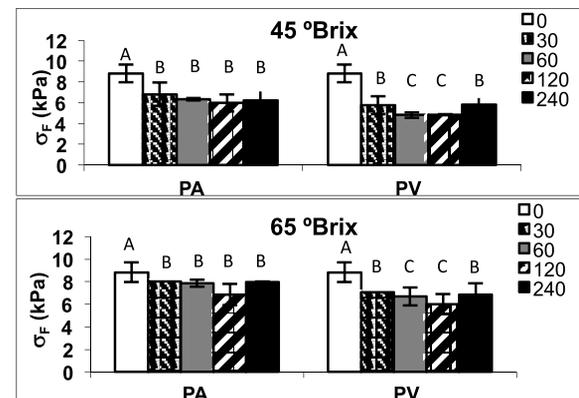
Figura 2. Curva típica esfuerzo-deformación para muestras de pitahaya amarilla.



módulo de elasticidad, presentando un límite de fluencia al final de esta zona lineal, seguida de una región no lineal, donde se muestra un aumento del esfuerzo hasta un punto crítico en el cual se presenta el esfuerzo máximo de fractura o fractura macroscópica de la muestra. En esta fractura macroscópica, los tejidos de la pitahaya pueden fallar por ruptura de la pared celular y por la pérdida de unión o adherencia entre células generada por alteración de las lamelas que es una capa compuesta de polisacáridos que rodea la pectina de la pared celular y genera la unión entre las células [12]. Este comportamiento es característico de frutas enteras y mínimamente procesadas y se ha observado en la compresión uniaxial de diferentes productos cortados y enteros como calabaza fresca y deshidratada osmóticamente [12] manzana y papa [31], piña [32] y frutas confitadas [33].

Esfuerzo de fractura. El comportamiento de la fractura macro de un alimento sólido es una propiedad importante, por estar asociada con la percepción de 'crunch' durante la masticación [34]. La figura 3, muestra la evolución del esfuerzo de fractura (σ_F) de muestras de pitahaya durante el tiempo de DO a presión atmosférica y vacío. El promedio del σ_F para las muestras frescas fue de $8,83 \pm 0,86$ kPa. Todos los tratamientos presentaron un descenso significativo ($p < 0,05$) del esfuerzo entre el inicio y final del proceso DO, notándose un leve incremento al final del proceso (240 min). La disminución del esfuerzo de fractura es un indicador de ablandamiento de la fruta asociada a la pérdida del contenido de agua durante

Figura 3. Esfuerzo máximo de fractura de muestras de pitahaya amarilla durante la DO a 45 y 65 $^{\circ}$ Brix.



Letras diferentes indican diferencias significativas en el tiempo de proceso según el test de Tukey ($p=0.05$).

el proceso de deshidratación, que puede ser en parte por la disminución de la presión de turgencia celular (disminución de la fuerza ejercida del líquido intracelular sobre la membrana celular) debido a la pérdida de agua de la fruta durante la DO. De acuerdo a Nieto et al., [9], los tejidos vegetales frescos que contienen células turgentes son más crujientes, rígidas y de baja deformación a la fractura que aquellas células con baja presión de turgencia. Algunos investigadores [35], manifiestan que cuando las células vegetales pierden agua, no solo se reduce su volumen, sino que se altera o se deforma tanto la pared como la membrana celular del producto, lo que produce un cambio en la tensión mecánica sobre las lamelas o laminilla media que son las responsables de la unión de las células, este mismo comportamiento también se presentó en melón [36] y kiwi [10].

El repentino incremento del esfuerzo de fractura al final de la DO, puede ser atribuido, por un lado a que en este tiempo de DO se observó visualmente la presencia de las semillas sobresaliendo de la superficie de la pitahaya, debido al encogimiento sufrido de la fruta, las cuales pudieron ejercer mayor resistencia al esfuerzo de compresión uniaxial. Por otro lado, puede ser atribuida posiblemente a la cristalización de la celulosa en la pared celular en los niveles de humedad alcanzados a 240 min para los distintos tratamientos, haciendo difícil fracturar el material. Este comportamiento atípico se ha presentado también en la DO de otras frutas como banano, manzana y papa [37] y calabaza [12].

Los tratamientos deshidratados con mayor concentración de la SO (65°Brix) mostraron significativamente ($p < 0,05$) mayor tensión o esfuerzo de fractura (valores más cercanos a los de la muestra fresca sin tratamiento) tanto para tratamientos a vacío como atmosférico, lo cual significa un aumento en la dureza de las muestras de pitahaya deshidratada. Este resultado puede ser atribuido al aumento de viscosidad de la SO a 65°Brix, promoviendo una estructura más sólida, debido a la capa de soluto formada alrededor de superficie la fruta por la transferencia de Xss [36]; similar comportamiento se encontró en la DO de kiwi [10].

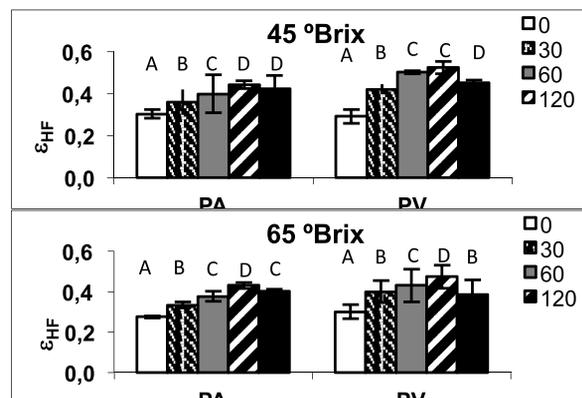
Con respecto al factor presión, las muestras tratadas con pulso de vacío, tanto a 45 como a 65°Brix, mostraron significativamente ($p < 0,05$) menores valores del σ_f respecto a las correspondientes a presión atmosférica. Este resultado evidencia el efecto negativo de la aplicación del pulso de vacío sobre la firmeza del tejido de la pitahaya, provocando mayor ablandamiento a la fruta. Esto puede

ser atribuido a que el pulso de vacío posiblemente haya ocasionado algunas deformaciones en la matriz celular de la fruta, debido a la rápida salida del agua del alimento y de la entrada de solutos provenientes de la SO; debilitando a la pared celular y a las lamelas o laminilla media. Además, Ferrari *et al.*, [38] manifiestan que el pulso de vacío puede promover la apertura de poros, permitiendo mayor facilidad a la transferencia de masa con posibles daños mecánicos a la matriz estructural como la pérdida de la turgencia celular y alteraciones a la resistencia de la pared celular. Otros investigadores [39], argumentan que la aplicación del pulso de vacío en la DO, puede provocar daños irreversibles a la estructura celular de algunas frutas, como la pérdida de la unión (adherencia) celular asociada a menor esfuerzo de fractura (mayor ablandamiento) y mayor deformación. Estos resultados están de acuerdo con los reportados en la DO de melón [36] Kiwi [10] y fresas [40] y manzanas [41].

Deformación de Fractura. El comportamiento de la máxima deformación de fractura de muestras de pitahaya amarilla durante la deshidratación osmóticamente a 45 y 65°Brix se presenta en la figura 4.

Puede notarse el leve incremento de la deformación a la fractura en todos los tratamientos durante la DO, lo que significa que la pitahaya fue más blanda o menos resistente con menor contenido de humedad. Esta misma tendencia se observó en la DO de kiwi [10] y calabaza [12]. Se evidencia una relación inversa entre el esfuerzo y la deformación de fractura, notándose que la fruta cuanto más se deforma requiere menor

Figura 4. Deformación de fractura de muestras de pitahaya amarilla durante la DO a 45 y 65°Brix.

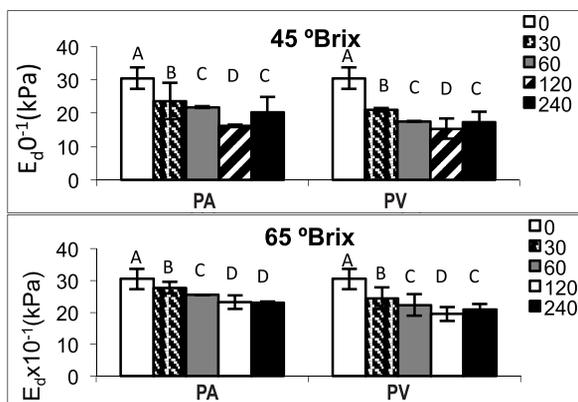


Letras diferentes indican diferencias significativas en el tiempo de proceso según el test de Tukey ($p = 0.05$).

esfuerzo de fractura (Esfuerzos analizados en los resultados del punto anterior). De otra manera se puede decir que cuando la fruta alcanza altos esfuerzos de fractura, menor es la deformación para alcanzar esta fractura. Este comportamiento puede comprobarse por los efectos de la aplicación del pulso de vacío y de la concentración de la SO; los tratamientos con pulso de vacío mostraron mayores deformaciones a la fractura (más blandas que las de presión atmosférica) durante DO, lo que indica que se requirieron menores esfuerzos para la fractura macroscópica de la fruta. De la misma manera en la concentración de sólidos solubles, se observó que a mayor concentración menor fue la deformación y mayor el esfuerzo de fractura. El ANOVA evidenció significativamente ($p < 0,05$) que la deformación de fractura disminuyó con el incremento de la concentración de la SO, mientras que se incrementó significativamente ($p < 0,05$) con aplicación de presión de vacío. Estos resultados significan que las muestras de pitahaya amarilla con mayor presión de turgor celular, se fracturan a menor distancia o deformación y mayor esfuerzo.

Modulo elástico (ME). El módulo de elasticidad (pendiente de la zona lineal de la curva de compresión esfuerzo-deformación), está asociado con la sensación inicial de firmeza cuando se mastica un alimento [41]. Además, es un indicador de la resistencia que tiene un material sometido a una compresión sin que se fracture. En la figura 5, se muestra la variación del ME en los diferentes tratamientos osmóticos.

Figura 5. Módulo de elasticidad de muestras de pitahaya amarilla durante la DO a 45 y 65 °Brix.



Letras diferentes indican diferencias significativas en el tiempo de proceso según el test de Tukey ($p = 0.05$).

EL ME fue afectado significativamente ($p < 0,05$) por el tiempo de DO (disminución de humedad) y los factores presión y concentración. Se observó que el ME presentó el mismo comportamiento del esfuerzo de fractura (analizado anteriormente), disminuyó por el incremento del tiempo de DO y por la aplicación del pulso de vacío, mientras que aumentó con el incremento de la concentración de sacarosa en la SO. En general, durante el tiempo de DO los tratamientos comportaron un descenso notable del módulo inicial de elasticidad (pérdida de elasticidad o de la rigidez), notándose un leve incremento al final del proceso (240 min); este resultado puede estar asociado a la disminución de la presión de turgencia de las células. Ya que al disminuir la presión de turgencia se puede reducir el área de contacto entre las células y por consiguiente disminuir la fuerza de unión intercelular [10]. Resultados similares se encontraron en la DO de mango y kiwi [10]. Con el aumento de la concentración de sacarosa, se incrementó el módulo de elasticidad del producto, asociado posiblemente a la formación de una capa de sacarosa formada alrededor de la superficie de la fruta durante el proceso osmótico, generando una estructura más rígida. Este comportamiento es similar a los reportados por Nieto *et al.*, [9] en la DO de manzana con solutos de trehalosa y glucosa. Con la aplicación del pulso de vacío se disminuyó la elasticidad (menos rigidez) de la fruta en ambas concentraciones (45 y 65 °Brix), asociado posiblemente a la obtención de una estructura menos compacta por la sustitución del gas ocluido en los poros de la fruta por la entrada de solución osmótica; asociado también con la mayor pérdida presión de turgencia, explicado anteriormente.

CONCLUSIONES

Las propiedades mecánicas de pitahaya amarilla durante la DO fueron dependientes del tiempo de proceso (asociado con la disminución de humedad), concentración de la SO, y el nivel de presión aplicado. El esfuerzo de fractura y el módulo de elasticidad disminuyeron significativamente con la pérdida de humedad de la fruta, mientras que la deformación de fractura se incrementó. La firmeza de la fruta se incrementó con mayor concentración de sacarosa en la SO (65 °Brix), asociado a mayor ganancia de sólidos solubles. La aplicación del pulso de vacío incrementó la transferencia de masa (mayor pérdida de agua y mayor ganancia de sólidos solubles), pero no favoreció la firmeza de la fruta, provocando mayor ablandamiento respecto a

la DO sin pulso de vacío. De acuerdo con estos resultados, las muestras de pitahaya amarilla deshidratadas osmóticamente a 65°Brix y a presión atmosférica presentaron mayor firmeza que las deshidratadas a 45°Brix y con pulso de vacío.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de la República de Colombia y a la Asociación de Productores de Pitahaya (Asoppitaya).

REFERENCIAS

- [1] PERUSSELLO, C.A., KUMAR, C., DE CASTILHO, F. and KARIM, M.A. Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). Applied Thermal Engineering, 63(1), 2014, p. 23-22.
- [2] CHANDRA, S. and KUMARI, D. Recent development in osmotic dehydration of fruit and vegetables: a review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 55(4), 2015, p. 552-561.
- [3] CORREA, J., VIANA, A., MENDONÇA, K. and JUSTUS, A. Optimization of pulsed vacuum osmotic dehydration of sliced tomato. In J. M. P. Q. Delgado, & A. Gilson Barbosa de Lima (Eds.). Drying and energy Technology, 63(4), 2016, p. 207-228.
- [4] GARCÍA, M., ALVIS, A. y GARCÍA, C. Evaluación de los Pre-tratamientos de Deshidratación Osmótica y Microondas en la Obtención de Hojuelas de Mango (*Tommy Atkins*). Información tecnológica, 26(5), 2015, p. 63-70.
- [5] PHISUT, N., RATTANAWEDDEE, M. and AEKKA-SAK, K. Effect of osmotic dehydration process on the physical, chemical and sensory properties of osmo-dried cantaloupe. International Food Research Journal, 20(1), 2013, p. 189-196.
- [6] AHMED, I., QAZI, I. and JAMAL, S. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 34, 2016, p. 29-43.
- [7] DE OLIVEIRA, L., CORREA, J., PEREIRA, M., RAMOS, A. and VILELA, M. Osmotic dehydration of yacon (*Smallanthus sonchifolius*): Optimization for fructan retention. LWT - Food Science and Technology, 71, 2016, p. 77-87.
- [8] CORRÊA, J., ERNESTO, D. and MENDONÇA, K. Pulsed vacuum osmotic dehydration of tomatoes: Sodium incorporation reduction and kinetics modeling. LWT - Food Science and Technology, 71, 2016, p. 17-24.
- [9] NIETO, A.B., VICENTE, S., HODARA, K., CASTRO, M.A. and ALZAMORA, S.M. Osmotic dehydration of apple: Influence of sugar and water activity on tissue structure, rheological properties and water mobility. Journal of Food Engineering, 119(1), 2013, p. 104-114.
- [10] CHIRALT, A., MARTINEZ-NAVARRETE, N., MARTINEZ-MONZO, J., TALENS, P., MORAGA, G., AYALA, A. and FITO, P. Changes in mechanical properties throughout osmotic processes: Cryoprotectant effect. Journal of Food Engineering, 49(2-3), 2001, p. 129-135.
- [11] SHIRVANI, M., GHANBARIAN, D. and GHASEMI, M. Measurement and evaluation of the apparent modulus of elasticity of apple based on Hooke's, Hertz's and Boussinesq's theories. Measurement (UK), 54(1), 2014, p. 133-139.
- [12] MAYOR, L., CUNHA, R.L. and SERENO, A.M. Relation between mechanical properties and structural changes during osmotic dehydration of pumpkin. Food Research International, 40(4), 2007, p. 448-460.
- [13] RIBEIRO, A., AGUIAR-OLIVEIRA, E. and MALDONADO, R.R. Optimization of osmotic dehydration of pear followed by conventional drying and their sensorial quality. LWT - Food Science and Technology, 72, 2016, p. 407-415.
- [14] LUPU, M., PXDUREANU, V. and CANJA, C. The influence of speed compression on the maize grinding process. Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering, 8(1), 2015, p. 71-74.
- [15] TORRES, L., AYALA, A. and SERNA, L. Viscoelastic behavior of yellow pitahaya treated with 1-MCP. Dyna, 83(196), 2016, p. 119-123.
- [16] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (ICONTEC). NTC 3554, en Frutas frescas: Pitahaya. Bogotá (Colombia): Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1996.
- [17] HAJ NAJAFI, A., YUSOF, Y.A., RAHMAN, R.A., GANJLOO, A. and LING, C.N. Effect of osmotic dehydration process using sucrose solution at mild temperature on mass transfer and quality attributes of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*). International Food Research Journal, 21(2), 2014, p. 625-630.
- [18] TRAFFANO-SCHIFFO, M.V., TYLEWICZ, U., CASTRO-GIRALDEZ, M., FITO, P.J., RAGNI, L. and DALLA ROSA, M. Effect of pulsed electric fields pre-treatment on mass transport during the osmotic dehydration of organic kiwifruit. Innovative

- Food Science & Emerging Technologies, 38(Part a), 2016, p. 243-251.
- [19] ŞAHIN, U. and ÖZTÜRK, H. Effects of pulsed vacuum osmotic dehydration (PVOD) on drying kinetics of figs (*Ficus carica* L). Innovative Food Science & Emerging Technologies, 36, 2016, p. 104-111.
- [20] AYALA, A., SANCHEZ, M. and RODRIGUEZ, H. influencia de la osmocongelación sobre algunas propiedades físicas de papaya (*Carica papaya* L.). Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 17(2), 2014, p. 487-494.
- [21] CORREA, J., JUSTUS, A., OLIVEIRA, L. and ALVES, G. Osmotic dehydration of tomato assisted by ultrasound: evaluation of the liquid media on mass transfer and product quality. International Journal of Food Engineering, 11(4), 2015, p. 505-516.
- [22] VIANA, A.D., CORREA, J.L. and JUSTUS, A. Optimization of pulsed vacuum osmotic dehydration of cladodes of fodder palm. International Journal of Food Science & Technology, 49(3), 2014, p. 726-732.
- [23] ASSOCIATION OF THE OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). Official Methods of Analysis. 13th ed. Washington D.C. (USA): 1980.
- [24] ABRAAO, A.S., LEMONS, A.M., VILELA, A., SOUSA, J.M. and NUNES, F.M. Influence of osmotic dehydration process parameters on the quality of candied pumpkins. Food and Bioproducts Processing. 2013, 91(4), p. 481-494.
- [25] BARMAN, N. and BADWAIK, L. Effect of ultrasound and centrifugal force on carambola (*Averrhoa carambola* L.) slices during osmotic dehydration. Ultrasonics Sonochemistry, 34, 2017, p. 37-44.
- [26] TIROUTCHELVAME, D., SIVAKUMAR, V. and PRAKASH-MARAN, J. Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of amla (*Emblica officinalis* L.) cubes in sugar solution. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly, 21(4), 2015, p. 547-559.
- [27] BROCHIER, B., MARCZAK, L. and NORENA, C. Use of Different Kinds of Solutes Alternative to Sucrose in Osmotic Dehydration of Yacon. Brazilian Archives of Biology and Technology, 58(1), 2015, p. 34-40.
- [28] DA SILVA, W.P., SILVA, C.M.D.P.S., LINS, M.A.A. and GOMES, J.P. Osmotic dehydration of pineapple (*Ananas comosus*) pieces in cubical shape described by diffusion models. LWT- Food Science and Technology, 55(1), 2014, p. 1-8.
- [29] ŞAHINA, U. and ÖZTÜRK, H. Effects of pulsed vacuum osmotic dehydration (PVOD) on drying kinetics of figs (*Ficus carica* L). Innovative Food Science & Emerging Technologies. 36, 2016, p. 104-111.
- [30] CORREA, J., ERNESTO, D., ALVES, J. and ANDRADE, R.S. Optimization of vacuum pulse osmotic dehydration of blanched pumpkin. International Journal of Food Science & Technology, 49(9), 2014, p. 2008-2014.
- [31] SINGH, F., KATIYAR, V.K. and SINGH, B.P. Analytical study of turgor pressure in apple and potato tissues. Postharvest Biology and Technology, 89, 2014, p. 44-48.
- [32] SILVA, K.S., FERNANDES, M.A. and MAURO, M.A. Effect of calcium on the osmotic dehydration kinetics and quality of pineapple. Journal of Food Engineering, 134, 2014, p. 37-44.
- [33] VILELA, A., SOBREIRA, C., ABRAÃO, A., LEMOS A. and NUNES, F. Texture Quality of Candied Fruits as Influenced by Osmotic Dehydration Agents. Journal of Texture Studies, 47(3), 2016, p. 239-252.
- [34] ROSENTHAL, A. Instrumental characterisation of textural properties of solid and semi-solid food, In Modifying Food Texture. Sawston (UK): Jianshe Chen and Andrew Rosenthal, Woodhead Publishing, 2015, 2, p. 89-105.
- [35] ALZAMORA, S.M., CASTRO, M.A., VIDALES, S.L., NIETO, A.B. and SALVATORI, D. The roll of tissue microstructure in the textural characteristics of minimally processed fruits. In Alzamora, S.M., Tapia, M.S. & López Malo (Eds.). Minimally processed fruits and vegetables, fundamental aspects and applications. Gaithersburg (USA): Aspen Publishers, Inc., 2000, p. 153-171.
- [36] FERRARI, C. and HUBINGER, M. Evaluation of the mechanical properties and diffusion coefficients of osmodehydrated melon cubes. International Journal of Food Science & Technology, 43(11), 2008, p. 2065-2074.
- [37] KROKIDA, M.K., KARATHANOS, V.T. and MAROULIS, Z.B. Compression analysis of dehydrated agricultural products. Drying Technology, 18(1-2), 2000, p. 395-408.
- [38] FERRARI, C.C., ARBALLO J.R., MASCHERONI, R.H. and HUBINGER, M.D. Modelling of mass transfer and texture evaluation during osmotic dehydration of melon under vacuum. International Journal of Food Science & Technology, 46(2), 2011, p. 436-443.
- [39] CHIRALT, A. and TALENS, P. Physical and chemical induced by osmotic dehydration in plant tissues. Journal of Food Engineering, 67(1-2), 2005, p. 166-177.

-
- [40] CASTELLO, M.L., FITO, P.J. and CHIRALT, A. Changes in respiration rate and physical properties of strawberries due to osmotic dehydration and storage. *Journal of Food Engineering*, 2010, 97(1), p. 64-71.
- [41] KIM, E.H.J., CORRIGAN, V.K., WILSON, A.J., WATERS, I.R., HEDDERLEY, D.I. and MORGENSTERN, M.P. Fundamental Fracture Properties Associated with Sensory Hardness of Brittle Solid Foods. *Journal of Texture Studies*, 43 (1), 2012, p. 49-62.