



# **Modificación de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas:**

factores de proceso y métodos no térmicos

---

**J. E. González-Pérez\* y A. López-Malo**

\*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos  
Correo electrónico: [julio.gonzalezpz@udlap.mx](mailto:julio.gonzalezpz@udlap.mx) • [aurelio.lopezm@udlap.mx](mailto:aurelio.lopezm@udlap.mx)

## RESUMEN

La osmodeshidratación de frutas y hortalizas es un proceso lento debido a la resistencia en la transferencia de masa (TM). Dicha resistencia se puede modificar variando la solución osmótica, las condiciones del proceso o implementando tratamientos no térmicos (TNT). Los TNT permiten modificar la permeabilidad de la pared celular, bien por el incremento de la superficie de contacto con la disminución de la presión de vacío (pulsos de vacío), por el aumento de la presión del sistema (altas presiones hidrostáticas), o bien por la formación de poros en la membrana celular (campo eléctrico pulsado) o microcanales (ultrasonido y osmo-sonicación). Las características de la TM ocasionadas por cambios de las condiciones experimentales se pueden describir con modelos matemáticos, como la segunda ley de Fick. El objetivo de esta revisión es analizar distintos factores que modifican la TM durante la osmodeshidratación, así como la aplicación de TNT para modificarla. Además, se analizará el estudio de modelos que describen estos procesos.

**Palabras clave:** deshidratación osmótica, permeabilidad de la membrana celular, métodos no térmicos, transferencia de masa.

## ABSTRACT

Osmodehydration of fruits and vegetables is a slow process due to resistance in mass transfer (MT). This resistance can be modified by varying the osmotic solution, the process conditions or by implementing non-thermal treatments (NTT). NTT allow modifying the permeability of the cell wall by increasing the contact surface area with the decrease in atmospheric pressure (vacuum pulses), by increasing the system pressure (high hydrostatic pressures), or by the formation of pores in the cell membrane (pulsed electric field) or microchannels (ultrasound and osmo-sonication). Mathematical models, such as Fick's second law, can be used to describe the characteristics of MT caused by changes in experimental conditions. The aim of this review is to analyze the different factors that modify MT during osmo-dehydration, as well as the application of NTT to modify it. Furthermore, it will analyze the study of models that describe these processes.

**Keywords:** osmotic dehydration, cell wall permeability, non-thermal treatments, mass transfer.

## INTRODUCCIÓN

Las frutas y hortalizas contribuyen al adecuado balance de la dieta humana al ser una fuente crucial de compuestos nutracéuticos. Estos compuestos pueden ser vitaminas, minerales, fibra, colorantes naturales, o antioxidantes, los cuales pueden ser benéficos para el cuerpo humano (Ciurzyńska *et al.*, 2016; Omolola *et al.*, 2017; Ramya y Jain, 2017). No obstante, las frutas y hortalizas tienen un elevado contenido de humedad que propicia cambios bioquímicos y microbiológicos que disminuyen su vida de anaquel (Rahman, 2017; Chitrakar *et al.*, 2019). La deshidratación permite obtener alimentos de humedad baja (menor a 20 %, *p/p*) o humedad intermedia (20-50 %, *p/p*), que pueden almacenarse por largos periodos (Barbosa de Lima *et al.*, 2016; Qiu *et al.*, 2019). Los principales métodos de deshidratación involucran el uso de temperatura, lo cual puede generar pérdida de nutrientes termosensibles, además de modificaciones de características sensoriales (provocadas por reacciones químicas o enzimáticas), así como cambios morfométricos, entre otros parámetros de calidad (Sabarez, 2018; Qiu *et al.*, 2019).

La deshidratación osmótica es un método que permite obtener alimentos de humedad intermedia. Además, ayuda a inhibir el oscurecimiento enzimático, mejorando la apariencia y el sabor de frutas y hortalizas gracias a la incorporación de solutos presentes en una solución hipertónica y a la eliminación simultánea de agua (Omolola *et al.*, 2017; Ramya y Jain, 2017). Sin embargo, durante este proceso la transferencia de masa es lenta (Kuo *et al.*, 2018) y puede haber pérdida de vitaminas, minerales o algunos ácidos orgánicos a través de lixiviación de sólidos (Yadav y Singh, 2014). Para acelerar los mecanismos de transferencia de masa, se han estudiado diferentes parámetros que podrían estar involucrados en la velocidad del proceso como: el agente osmótico (composición y concentración), la matriz alimenticia (modificaciones físicas o químicas) o las condiciones de proceso (tiempo, agitación o temperatura) (Monnerat *et al.*, 2010; Pacheco-Angulo *et al.*, 2016; Fernandes y Rodrigues, 2017; Cichowska *et al.*, 2019;

González-Pérez *et al.*, 2019; Nowacka, Laghi *et al.*, 2019).

En la industria alimentaria, el principal parámetro utilizado para reducir el tiempo de operación durante el proceso de deshidratación osmótica es la temperatura. El aumento de la temperatura durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas incrementa la permeabilidad de su membrana celular y acelera la transferencia de masa (Assis *et al.*, 2016; Akharume *et al.*, 2019). Sin embargo, temperaturas elevadas pueden afectar negativamente y disminuir la calidad del producto (color, textura, sabor, entre otros) (Barbosa de Lima *et al.*, 2016; Sabarez, 2018). Algunas de las alternativas son el uso de métodos no térmicos, como las altas presiones hidrostáticas, los pulsos de vacío, los pulsos eléctricos, el ultrasonido y la osmo-sonicación (Martín-Belloso y Morales-de la Peña, 2018; Nowacka *et al.*, 2018; Dash *et al.*, 2019; de Mello *et al.*, 2019; Osae *et al.*, 2019).

La osmodeshidratación de frutas y hortalizas asistida por métodos no térmicos no afecta la calidad del producto final y permite alterar la permeabilidad de su membrana celular. Esta alteración ayuda a reducir los tiempos de proceso gracias a que incrementa la tasa de transferencia de masa (Dermesonlouoglou *et al.*, 2016; Onwude *et al.*, 2017; Deng *et al.*, 2019).

El objetivo de esta revisión es abordar estudios recientes sobre la modificación de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas, considerando algunos parámetros de proceso y métodos no térmicos analizados a través de modelos y cinéticas de proceso.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1. Mecanismos de deshidratación osmótica

La deshidratación osmótica es un proceso de deshidratación parcial de alimentos mediante la transferencia de masa por contacto sólido-líquido; consiste en la inmersión de un material alimenticio en una solución hipertónica (Pacheco-Angulo *et al.*, 2016; Muñoz-Becerra *et al.*, 2017). En la figura 1 se presenta esquemáticamente el proceso de deshidratación osmó-



tica de frutas y hortalizas. Este proceso ocurre debido a que la concentración de solutos presentes en la solución osmótica (agente osmótico) es mayor a la de la matriz alimenticia. El agua de la matriz alimenticia (presente en el protoplasto de sus células) pasa a la solución hipertónica a través de la membrana celular (plasmalema). El plasmalema se comporta como una membrana semipermeable, ya que, además de la pérdida de agua, permite la ganancia de algunos solutos presentes en la solución osmótica (sales, azúcares, ácidos orgánicos, minerales, colorantes, entre otros). Después de atravesar el plasmalema, estos solutos ocupan el volumen entre la pared celular y el plasmalema (Ahmed *et al.*, 2016; Ciurzyńska *et al.*, 2016; Dash *et al.*, 2019). Durante este proceso, los flujos simultáneos de solutos y agua se extienden desde la superficie del producto hasta el centro del material gracias a la diferencia de presión osmótica entre la matriz alimenticia y la solución osmótica. El

proceso finaliza cuando se alcanza un estado de equilibrio osmótico, es decir, cuando la diferencia entre las presiones osmóticas es casi nula (Ahmed *et al.*, 2016).

## 2. Factores que afectan el proceso de deshidratación osmótica

La velocidad de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas depende de muchos factores, entre ellos la naturaleza de la matriz alimenticia, la composición del agente osmótico (tablas I y II) y las condiciones de proceso, como temperatura, velocidad de agitación o tiempo de inmersión (tabla II) (Pacheco-Angulo *et al.*, 2016; Liu y Peng, 2017; Shete *et al.*, 2018). La selección de las condiciones óptimas de cada factor de proceso depende de las características deseadas en el producto osmodeshidratado (Ciurzyńska *et al.*, 2016).

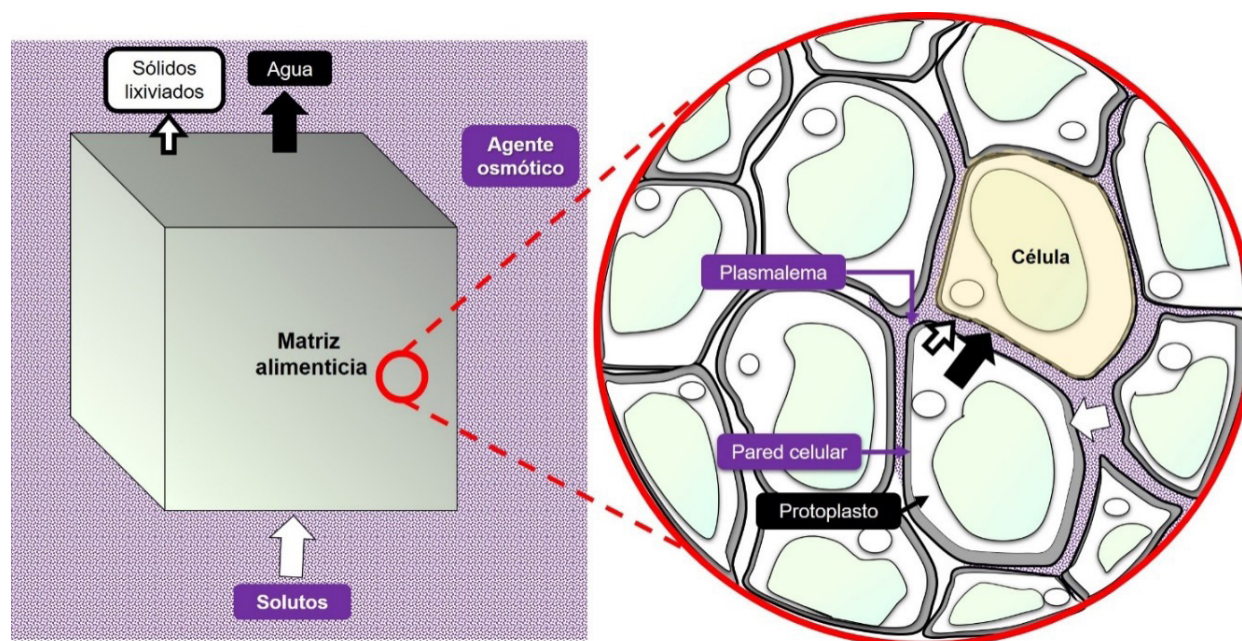


Figura 1.

Transferencia de masa durante el proceso de deshidratación osmótica de frutas u hortalizas. Adaptada de Mavroudis *et al.* (2012).

Tabla I. Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas con diferente porosidad

Matriz <sup>a</sup>		Agente osmótico <sup>b</sup>					
Fruta u hortaliza	Porosidad	NaCl <sup>c</sup>		Sacarosa <sup>d</sup>		Jugo concentrado de chokeberry <sup>d</sup>	
		GS <sup>e</sup>	PA <sup>f</sup>	GS <sup>e</sup>	PA <sup>f</sup>	GS <sup>e</sup>	PA <sup>f</sup>
Calabaza var. <i>Butternut</i>	4.98	0.019	0.083	0.093	0.311	0.120	0.33
Calabaza var. <i>Orange</i>	8.62	0.019	0.088	0.107	0.354	0.126	0.376
Calabaza var. <i>Muscat de Provence</i>	6.49	0.024	0.155	0.094	0.545	0.121	0.493
Raíz de remolacha var. <i>Alto</i>	4.16	0.002	0.229	0.048	0.443	0.086	0.425
Perejil var. <i>Eagle</i>	22.64	0.001	0.049	0.049	0.266	0.049	0.313
Zanahoria var. <i>Nerac</i>	3.45	0.010	0.119	0.089	0.378	0.11	0.326
Apio var. <i>Diamant</i>	11.07	0.013	0.147	0.074	0.403	0.099	0.432
Rábano var. <i>Omny</i>	3.19	0.020	0.171	0.102	0.567	0.128	0.548
Nabo negro var. <i>Kulata Cerna</i>	20.62	0.027	0.059	0.074	0.453	0.129	0.432
Manzana var. <i>Champion</i>	26.75	0.001	0.085	0.088	0.367	0.071	0.445

<sup>a</sup> Rebanadas cilíndricas (diámetro = 18 mm, espesor = 3.35 mm),  $a_w$  = 0.9830 - 0.9940; <sup>b</sup> 45 °C, 3 g agente osmótico / g producto durante 90 min; <sup>c</sup> 0.05 g NaCl / g solución;  $a_{w, NaCl}$  = 0.9851; <sup>d</sup> 40 °Brix;  $a_{w, sacarosa}$  = 0.9808;  $a_{w, jugo}$  = 0.9449; <sup>e</sup> GS: ganancia de solutos (g soluto / g producto fresco); <sup>f</sup> PA: pérdida de agua (g agua / g producto fresco). Adaptada de Lech et al. (2018).

Tabla II. Factores que afectan al proceso de deshidratación osmótica de frutas y hortalizas

Agente osmótico		Condiciones de operación	Matriz	Observaciones	Referencias
Tipo	Concentración				
Soluciones con un solo componente					
NaCl	0.02 - 0.2 g NaCl / g solución	40 °C, 4 - 20 ml solución / g producto, 1,440 min y 190 rpm	Zanahoria	La disminución de la relación de agente osmótico y matriz alimenticia condujo a una reducción de la pérdida de agua y de la ganancia de solutos (en el equilibrio).	Pacheco-Angulo et al. (2016)
	0.05 - 0.15 g NaCl / g solución	40 - 60 °C y 150 min	Ñame (Amorphophallus spp.)	La concentración de la solución y la temperatura del proceso modifican el transporte de masa.	Sangeeta y Hathan (2016)

**Tabla II.** Factores que afectan al proceso de deshidratación osmótica de frutas y hortalizas (continuación)

Agente osmótico		Condiciones de operación	Matriz	Observaciones	Referencias
Tipo	Concentración				
NaCl	0.05 - 0.25 g NaCl / mL solución	30 - 70 °C, 1 ml solución / g producto, 150 min	Calabaza ( <i>Cucurbita moschata</i> )	Los principales factores que modificaron el transporte de masa durante este proceso fueron la concentración y temperatura de la solución osmótica y el tiempo de inmersión.	Rahman <i>et al.</i> (2015)
	0.10 y 0.25 g NaCl / g solución	40 - 80 °C, 15 g producto / g solución, 180 min, 120 rpm	Champiñón blanco ( <i>Agaricus bisporus</i> )	La pérdida de agua y ganancia de sólidos influyen en la disminución del volumen del producto.	González-Pérez <i>et al.</i> (2019)
Sacarosa	30 - 50 °Brix	30 - 50 °C, 20 g solución / g producto, 240 min, 120 rpm	Litchi ( <i>Litchi chinensis Sonn</i> )	La concentración de la solución y la temperatura influyen en la velocidad de transferencia de masa.	Bera y Roy (2015)
		30 - 50 °C, 5 - 15 g solución / g producto, 30 - 180 min	Amla, grosella espinosa india o amalak ( <i>Embllica officinalis</i> L.)	Las relaciones de agente osmótico y matriz alimenticia de este experimento no tienen influencia significativa en los parámetros de transferencia de masa.	Tiroutchelvame <i>et al.</i> (2015)
	35 - 65 °Brix	40 °C, 2 g solución / g producto, 360 min, con agitación	Papaya var. <i>Khaek dam</i> ( <i>Carica papaya</i> L.)	La reducción de actividad de agua se incrementó en función del aumento de sacarosa.	Rongtong <i>et al.</i> (2018)
	40 - 70 °Brix	40 - 70 °C, 20 g solución / g producto, 1,800 rpm	Uchuva ( <i>Physalis peruviana</i> L.)	En temperaturas mayores a 55 °C se incrementa la reducción de carotenoides totales (aproximadamente 50 %).	Luchese <i>et al.</i> (2015)
Soluciones con más de un componente					
Jarabe de maíz (JM)	0.44 - 0.56 g JM / g solución	34 - 46 °C, 10 g solución / g producto, 120 - 210 min	Papaya ( <i>Carica papaya</i> L.)	La ganancia de solutos (de la matriz osmodeshidratada) obtenidas en soluciones de JM son inferiores a las de soluciones de sacarosa debido a su alta viscosidad y contenido de polisacáridos.	El-Aouar <i>et al.</i> (2006)
Soluciones de NaCl y sacarosa	A) 5 % NaCl y 50 % sacarosa / mL solución B) 15 % NaCl y 50 % sacarosa / mL solución	5 - 50 °C, 20 g solución / g producto, 60 - 180 min	Calabazas ( <i>Cucurbita</i> spp.)	La velocidad de transferencia de masa se ve influenciada en mayor medida por la concentración de NaCl.	Mokhtarian <i>et al.</i> (2014)
Soluciones de NaCl (PM = 58.44 g / mol), KCl (PM = 74.55g / mol) y CaCl <sub>2</sub> (PM = 110.93g / mol)	A) 10 % NaCl B) 7.5 % NaCl y 25 % KCl C) 7.0 % NaCl, 2.5 % KCl y 0.5 % CaCl <sub>2</sub> D) 5% NaCl, 4% KCl y 1 % CaCl <sub>2</sub>	30 °C, 10 g solución / g producto y 120 min	Berenjena ( <i>Solanum melongena</i> L.)	Los experimentos con 10 % NaCl ( $a_w = 0.9450$ ) alcanzaron una mayor pérdida de agua (7 - 16 %) respecto a las que tienen sustitutos de NaCl. Las muestras con CaCl <sub>2</sub> , presentaron una ganancia de solutos más alta (21 %) respecto a las que no tienen CaCl <sub>2</sub> .	De Jesus Junqueira <i>et al.</i> (2017)

**Tabla II.** Factores que afectan al proceso de deshidratación osmótica de frutas y hortalizas (continuación)

Agente osmótico		Condiciones de operación	Matriz	Observaciones	Referencias
Tipo	Concentración				
Soluciones de glicerol (PM = 92.09 g / mol), sorbitol (PM = 182.17 g / mol) y lactato de calcio en soluciones de 30 - 70 % de sorbitol o glicerol	A) 30, 50 y 70 % de glicerol o sorbitol B) 30, 50 y 70 % de glicerol o sorbitol adicionado con 20 g lactato de calcio / L solución	30 °C, 20 g solución / g producto, 720 min y 1,000 rpm	Yacón ( <i>Smallanthus sonchifolius</i> )	A) El sorbitol tuvo una menor permeabilidad en la matriz alimenticia debido a su peso molecular. El glicerol se usa para mejorar textura (plastificante); el sorbitol se usa como edulcorante. B) El lactato de calcio ayudó a prevenir el colapso celular.	Brochier et al. (2015)
Soluciones de sacarosa (PM = 342.30 g / mol), inulina (PM = 6,178.02 g / mol), sacarosa-inulina, sacarosa-jugo concentrado de chokeberry (JCC) (1 : 1) e inulina-JCC (4 : 1)	50 °Brix	30 y 50 °C, 2 g solución / g producto, 360 min, con agitación	Fresa var. Honeoye	La sustitución parcial de sacarosa (con JCC o inulina) permite obtener productos con menor humedad, mayor valor nutricional (menos azúcar simple) y enriquecidos con compuestos bioactivos. Debido a su peso molecular, se obtiene una menor transferencia de masa con inulina.	Kowalska et al. (2017)
Soluciones de glicerol (PM = 92.09 g / mol), eritritol (PM = 122.12 Da), glicósidos de esteviol (PM = 318.45 g / mol) y Citrox	40 - 60 % glicerol, 12.5 % eritritol, 1.25 % glucósidos de esteviol y 0.2 % Citrox	25 - 45 °C, 5 g solución / g producto, 240 min	Durazno	El glicerol permitió reducir la aw; el eritritol y los glicósidos de esteviol sirvieron como endulzante, y el Citrox como antimicrobiano. La velocidad de transferencia de masa se vio favorecida por el incremento de la temperatura y la concentración de glicerol.	Dermesonlouoglou y Giannakourou (2019)
Soluciones de sacarosa, miel y miel-sacarosa (1 : 1)	A) 60 - 80 °Brix B) 74 °Brix	30 y 50 °C, 7 g solución / g producto, 210 min	Piña ( <i>Ananas comosus</i> L.)	Las soluciones de sacarosa y miel-sacarosa registraron una mayor pérdida de agua que los productos tratados con soluciones de miel. Las muestras osmodeshidratadas con la solución miel-sacarosa tuvieron una mejor aceptación sensorial.	Sethi y Kaur (2019)
Jugos concentrados					
Manzana (JCM)	40 °Brix	40 °C, 2 g solución / g producto, 120 min	Cereza agria var. <i>Turgieniewka</i> ( <i>Prunus cerasus</i> L.)	El producto osmodeshidratado incrementó un 16 % el contenido de polifenoles y un 35 % la actividad antioxidante respecto al producto fresco.	Nowicka et al. (2015)
JCC ( <i>Aronia melanocarpa</i> )	40 °Brix	50 °C, 3 ml solución / g producto, 120 min	Remolacha var. <i>Alto FI</i>	La aplicación de JCC durante la etapa de deshidratación osmótica podría mejorar la funcionalidad y el color de los productos secos, al transferir compuestos bioactivos y organolépticos activos a la matriz alimenticia.	Lech et al. (2015)

**Tabla II.** Factores que afectan al proceso de deshidratación osmótica de frutas y hortalizas (continuación)

Agente osmótico		Condiciones de operación	Matriz	Observaciones	Referencias
Tipo	Concentración				
JCC ( <i>Aronia melanocarpa</i> )	40 °Brix	45 °C, 3 ml / g producto, 120 min	Chokeberry negro ( <i>Aronia melanocarpa</i> )	Los productos secos pretratados por osmodeshidratación mostraron un incremento de porosidad y una reducción de amargura en comparación con las muestras sin tratamiento.	Calín-Sánchez et al. (2015)
		45 °C, 2 ml solución / g de producto, 90 min	Arilos de granada var. <i>Mollar de Elche</i> ( <i>Punica granatum</i> L.)	El uso de JCC durante la deshidratación osmótica mejora la aceptación sensorial (parámetros de apariencia y homogeneidad del color) en comparación con las muestras sin tratamiento.	Cano-Lamadrid et al. (2017)
	60 °Brix	40 y 60 °C, 4 g solución / g producto, 120 min, 60 rpm	Manzana var. <i>Braeburn</i>	El color de las muestras osmodeshidratadas con JCC es más estable ( $p < 0.05$ ) que muestras osmodeshidratadas con sacarosa (a las mismas condiciones) durante 12 meses de almacenamiento.	Cichowska y Kowalska (2018)
	65 °Brix	45 °C, 4 g solución / g producto, 1,440 min, 60 rpm	Manzana var. <i>Gala</i>	El uso de JCC durante la deshidratación osmótica de manzana mejora la aceptación sensorial (parámetros de color y sabor) en comparación con el producto osmodeshidratado con soluciones de sacarosa a las mismas condiciones.	Samborska et al. (2019)
Granada var. Wonderful (GW); GW-JCC (1 : 1, v / v); GW-JCM (1 : 1, v / v); JCM-JCC (1 : 1, v / v); JCM-JCC (3 : 1, v / v)	40 °Brix	45 °C, 2 mL solución / g producto, 90 min	Arilos de granada var. <i>Mollar de Elche</i> ( <i>Punica granatum</i> L.)	Las soluciones permitieron obtener arilos osmodeshidratados con el mismo contenido de humedad. El uso de GW y GW-JCC mejoró la ganancia de solutos, incrementando el contenido de antocianinas totales.	Cano-Lamadrid et al. (2017)
Grosella negra (JCGN); cereza ácida (JCCA); frambuesa (JCF); membrillo (JCMB); flor de membrillo (JCFMB); JCM; JCC	40 °Brix	40 °C, 2 ml / g de producto, 90 min	Cereza ( <i>Prunus cerasus</i> L.)	Las soluciones de JCCA y JCCC enriquecieron 6.4 - 22.4 % de polifenoles; la de JCC aumentó hasta 1.5 la cantidad de procianidinas poliméricas y la de JCGN redujo el 10.14 % de antocianinas de la matriz alimenticia.	Nowicka et al. (2015)



## 2.1. Factores relacionados con la matriz alimenticia

Durante la osmodeshidratación de frutas y hortalizas, la composición química y algunas propiedades físicas de la matriz alimenticia influyen en las cinéticas de transferencia de masa. En el caso de la composición química de la matriz alimenticia, algunos estudios indican que la variedad y el grado de madurez pueden afectar la velocidad del proceso debido al tipo y concentración de los compuestos presentes en el producto (Ahmed *et al.*, 2016; Sulistyawati *et al.*, 2018). Mavroudis, Dejmek y Sjöholm (2004) compararon la ganancia de agua y pérdida de solutos durante la osmodeshidratación (50 °Brix de sacarosa a 5-40 °C) de diferentes variedades de manzana —específicamente Kim, Mutsu y Jonagold. Los autores encontraron que la transferencia de masa durante el proceso no tuvo el mismo comportamiento para todas estas variedades de manzana. Las variedades Kim y Jonagold registraron una mayor pérdida de agua (0.20-0.45 g agua/g producto) en relación con la ganancia de solutos (0.10-0.12 g soluto/g producto). En el caso de la variedad Mutsu, el proceso redujo muy poco su humedad, pero logró una mayor ganancia de sólidos, lo que permitió tener un producto adecuado para confitería. Por su parte, Sulistyawati *et al.* (2018), osmodeshidrataron (60 °Brix de sacarosa a 60 °C) mangos de la variedad Keny con diferente grado de madurez (inmaduros, 13.2 °Brix y maduros, 15.7 °Brix). Encontraron que el mango inmaduro mostró una ganancia de sólidos 2-5 veces mayor que los maduros.

Las cinéticas de proceso también pueden verse afectadas por las propiedades físicas de la matriz alimenticia, como la piel, porosidad, tamaño, forma, entre otros (Chandra y Kumari, 2015; Deng *et al.*, 2019). Se ha observado que la piel de frutas y hortalizas ejerce una resistencia a la transferencia de masa (Ketata *et al.*, 2013; Alfaro *et al.*, 2018). A pesar de que esta resistencia se puede reducir removiendo la piel o cortando el producto (Gómez-Ramírez *et al.*, 2013), la calidad (textura, color característico, entre otros atributos) de algunos productos puede modificarse al remover la piel. Por ello, la matriz alimenticia se somete a tratamientos que permiten incrementar la permeabilidad de la piel (Allahdad *et al.*, 2019). Alfaro *et al.* (2018), modificaron la permeabilidad de la piel de *Vaccinium angustifolium* Ait., sumergiéndolo en nitrógeno líquido (-196 °C, durante 10 segundos). Este tratamiento permitió que durante el proceso de deshidratación osmótica (60 °Brix de sacarosa a 40 °C por 8 horas) se alcanzara una reducción de humedad de un 20 % y un incremento de solutos del 23 %, con relación al mismo producto sin pretratamiento.

En la tabla I, se muestra cómo la porosidad de la matriz alimenticia afecta la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica en diferentes agentes osmóticos. Lech, Michalska, Wojdyło, Nowicka, y Figiel (2018) encontraron que la porosidad de la matriz alimenticia podría tener un impacto en la deshidratación osmótica. Entre más pequeña es la porosidad, más espacio disponible tiene la matriz alimenticia para la transferencia de masa, lo que implica una mayor pérdida de agua y ganancia de solutos (como el rábano var. *Omny* y la zanahoria var. *Nerac*), en comparación con las que tienen una mayor porosidad (manzana var. *Champion*).

Asimismo, Ruiz-López, Huerta-Mora, Vivar-Vera, Martínez-Sánchez y Herman-Lara (2010) compararon las características de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica (0.10 y 0.25 g NaCl/g solución, 4 g solución/g producto a 25 °C durante 3 horas) de prismas de chayote con diferentes dimensiones (1 × 1 × 2 y 1 × 1 × 4 cm). Los autores encontraron que las muestras con dimensiones más pequeñas alcanzaban rápidamente el estado de equilibrio. Finalmente, se concluyó que el tiempo de proceso fue proporcional a la longitud característica de la matriz alimenticia. González-Pérez *et al.* (2019) analizaron los cambios de la velocidad de transferencia de masa ocasionados por el encogimiento y deformación de la matriz alimenticia durante el proceso de osmodeshidratación (0.10 y 0.25 g NaCl/g solución, 15 g solución/g producto, 40, 60 y 80 °C) de pileos de champiñón blanco. Los autores hallaron que, si se considera que el volumen del producto permanece constante durante el proceso de osmodeshidratación, se genera una sobreestimación del 39-113 % en los parámetros correspondientes a la pérdida de agua y del 24-66 % para los relacionados con la ganancia de solutos.

## 2.2. Agente osmótico

La naturaleza del agente osmótico (solución osmótica) es un factor importante en el desarrollo de frutas y hortalizas osmodeshidratadas (Akharume *et al.*, 2019). El tipo de agente osmótico y su concentración influyen en la presión osmótica (tablas I y II). Esta presión es la única fuerza impulsora para la transferencia de masa durante la osmodeshidratación de alimentos, por lo que la rapidez del proceso dependerá, en mayor medida, de las características de este parámetro (Cheng *et al.*, 2014).

### 2.2.1. Tipos de agente osmótico

Las características del agente osmótico que deben ser consideradas en el proceso de deshidratación osmótica son la actividad de agua, el peso molecular y la solubilidad o el estado iónico de las

especies químicas presentes en la solución (Lech *et al.*, 2017). La actividad de agua ( $a_w$ ) es la propiedad fisicoquímica más importante del agente osmótico durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas (Lech *et al.*, 2017). Entre más grande es la diferencia de la  $a_w$  del agente osmótico y la de la matriz alimenticia, mayor es la fuerza impulsora para la transferencia de masa. En la tabla I se presentan algunos ejemplos relacionados con la influencia de la  $a_w$  en la transferencia de masa de diferentes frutas y hortalizas con  $a_w = 0.9830 - 0.9940$ . El jugo concentrado de *chokeberry* ( $a_w = 0.9449$ ) permitió obtener mayores pérdidas de agua y ganancias de solutos, a diferencia de las alcanzadas con la solución de NaCl ( $a_w = 0.9851$ ). Esto se atribuye a que la diferencia entre la  $a_w$  del jugo concentrado de *chokeberry* y la  $a_w$  de la matriz alimenticia fresca es mayor que la de la de soluciones de NaCl. Por otro lado, un agente osmótico con menor peso molecular puede penetrar fácilmente en las células de las frutas y verduras, en comparación con el agente osmótico de mayor peso molecular (Brochier *et al.*, 2015).

El tipo de solución osmótica utilizada depende principalmente de la compatibilidad con la matriz sometida al proceso osmótico. Generalmente, se emplea NaCl para vegetales, carnes rojas, pescado, camarón, entre otros. Mientras que para la osmo-deshidratación de frutas y hortalizas se utilizan sacarosa, edulcorantes o concentrados de frutas u hortalizas (Lech *et al.*, 2018). La influencia de varios agentes osmóticos se muestra en la tabla II.

### 2.2.2. Concentración de la solución osmótica

La concentración de la solución juega un papel importante en la velocidad de transferencia de masa. Algunos estudios indican que un aumento en la concentración de solutos da como resultado mayor pérdida de agua y ganancia de sólidos (Shete *et al.*, 2018). Este comportamiento se ha visto principalmente en soluciones de NaCl y sacarosa (Bera y Roy, 2015; Sangeeta y Hathan, 2016; Rongtong *et al.*, 2018; González-Pérez *et al.*, 2019). Para las soluciones osmóticas con más de un componente, la velocidad de transferencia se modifica principalmente por la concentración del compuesto con menor peso molecular, como se indica en algunos estudios de la tabla II (Mokhtarian *et al.*, 2014; De Jesus Junqueira *et al.*, 2017; Dermesonlouoglou y Giannakourou, 2019).

### 2.3. Condiciones de proceso

La influencia de las condiciones de proceso de deshidratación osmótica ha sido estudiada en los últimos años (Lech *et al.*, 2018). En la literatura encontramos diversos estudios sobre cómo las varia-

ciones en temperatura, la relación de agente osmótico y la matriz alimenticia, el tiempo de inmersión y la agitación del sistema osmótico afectan la transferencia de masa (tabla II).

#### 2.3.1. Temperatura de la solución osmótica

Algunas investigaciones encontraron que el incremento de la temperatura de la solución osmótica favorece la ganancia de solutos, ya que, a medida que la temperatura se eleva, también lo hace la solubilidad de los solutos en el líquido (Salim *et al.*, 2016); lo que modifica la viscosidad del medio osmótico (El-Aouar *et al.*, 2006). Asimismo, el incremento térmico del sistema puede acelerar en mayor porcentaje la pérdida de agua (Sangeeta y Hathan, 2016; Dermesonlouoglou y Giannakourou, 2019). Sin embargo, el proceso no debe exceder los 60 °C, ya que estas temperaturas pueden dañar los tejidos vegetales, favoreciendo al colapso de la matriz alimenticia (Ramya y Jain, 2017), o incrementar la pérdida de compuestos como los carotenoides (Luchese *et al.*, 2015).

#### 2.3.2. Relación del agente osmótico y matriz alimenticia

La relación entre el peso (o volumen) del agente osmótico y el peso de la muestra es de gran importancia durante el tratamiento osmótico de frutas y hortalizas. Puede afectar a la cinética de transferencia de masa, ya que el agua que pide el alimento durante el proceso disminuye la concentración de la solución osmótica (Ahmed *et al.*, 2016). Se recomienda una relación de producto y solución osmótica de al menos 1 : 15 cuando se trabaja con soluciones de NaCl, o de 1 : 2 o 1 : 3 para soluciones de sacarosa. Sin embargo, la elección de esta relación dependerá de la concentración que alcanzará la solución osmótica, considerando la dilución generada por el agua que el producto pierde durante el proceso (Tiroutchelvame *et al.*, 2015; Pacheco-Angulo *et al.*, 2016; Shete *et al.*, 2018).

#### 2.3.3. Tiempo de inmersión

El aumento del tiempo de inmersión provoca una mayor transferencia de masa. Al comienzo del proceso de deshidratación osmótica los fenómenos de transferencia de masa son rápidos, conforme la solución osmótica gana agua, la diferencia entre las presiones se reduce, lo que resulta en una velocidad de transferencia de masa más baja, hasta alcanzar un estado de equilibrio másico (Ahmed *et al.*, 2016). De manera simultánea, el tejido del producto puede sufrir una contracción a lo largo del proceso de deshidratación, reduciendo el espacio para llevar a cabo la transferencia de masa (Ramya y Jain, 2017).

#### 2.3.4. Agitación

El agua eliminada del producto osmodeshidratado puede diluir la solución osmótica a los alrededores del producto osmodeshidratado (Assis *et al.*, 2016). El uso de agitación durante el proceso de deshidratación osmótica homogeneiza el contacto entre el producto y la solución osmótica, disminuyendo el tiempo de transferencia de masa. Por lo general, para soluciones con solutos de bajo peso molecular, como NaCl, se utilizan velocidades de agitación de 120-190 rpm; esta velocidad también se ha usado para soluciones de 30-50 °Brix de sacarosa (Bera y Roy, 2015; Tiroutchelvame *et al.*, 2015). Cuando el agente osmótico es más viscoso (soluciones de sacarosa, sorbitol o glicerol con concentraciones mayores a 60 °Brix) las velocidades de agitación son de 1,000-1,800 rpm (Brochier *et al.*, 2015; Luchese *et al.*, 2015).

### 3. Métodos no térmicos aplicados en la osmodeshidratación para modificar la transferencia de masa

Como se presentó en secciones anteriores, la única fuerza impulsora para la transferencia de masa durante la osmodeshidratación es la presión osmótica. Esta fuerza impulsora requiere mucho tiempo para alcanzar un estado de equilibrio osmótico, a menos que se incremente la permeabilidad de la membrana celular (Deng y Zhao, 2008; Cheng *et al.*, 2014). La membrana celular de frutas y hortalizas ejerce una resistencia a la transferencia de masa. Si se consigue dañar la membrana celular con métodos no térmicos, se puede mejorar la eficiencia del proceso y la calidad de producto (Ahmed *et al.*, 2016). Se han estudiado una serie de métodos no térmicos en combinación con la deshidratación osmótica para mejorar la eficiencia del proceso y la calidad del producto final. Estas técnicas incluyen tratamiento con altas presiones hidrostáticas, con pulsos de vacío, pulsos eléctricos, ultrasonido y osmo-sonicación (Ramya y Jain, 2017; Feng *et al.*, 2019).

#### 3.1. Altas presiones hidrostáticas

El tratamiento de alimentos con altas presiones hidrostáticas (HHP) implica la aplicación de presión hidrostática (50-1,000 MPa) sobre un producto (Witrowa-Rajchert *et al.*, 2014). La

combinación de HHP con deshidratación osmótica (DO-HHP) consiste en colocar la matriz alimenticia en bolsas de polietileno con 3-20 g de solución osmótica/g de producto y sellar al vacío (George *et al.*, 2016; Luo *et al.*, 2018). Posteriormente, esta bolsa se coloca en un sistema cerrado que contiene al medio de transmisión de la presión (agua destilada o 30 % de propilenglicol) (Verma *et al.*, 2014; Dermesonlouoglou *et al.*, 2019), este medio va a ejercer presión por compresión física mediante reducción mecánica de volumen (figura 2). Cuando frutas y hortalizas se tratan previamente con HHP, la membrana celular se permeabiliza, lo que facilita la difusión y proporciona mayores tasas de deshidratación (Deng *et al.*, 2019).

En la tabla III se muestran ejemplos de la aplicación de HHP para asistir la deshidratación osmótica de frutas. Algunos investigadores usaron las HHP para incrementar la pérdida de agua a través de la ruptura de la pared celular (Verma *et al.*, 2014; Sulistyawati *et al.*, 2018). Sin embargo, la modificación de la pared celular no siempre influye en la transferencia de masa (Núñez-Mancilla *et al.*, 2013, 2014; Dermesonlouoglou *et al.*, 2019). Núñez-Mancilla *et al.* (2013), analizaron tratamientos de *Fragaria vesca* en soluciones a 40 °Brix de sacarosa con DO-HHP, sin encontrar diferencias significativas en los parámetros de transferencia de masa en presiones hidrostáticas mayores a 400 MPa. Dermesonlouoglou *et al.* (2019) hallaron que las modificaciones a la pared celular de duraznos y albaricoques, debido al tratamiento de HHP (100 MPa) con deshidratación osmótica, afectaban principalmente a la dureza del producto final. Por otro lado, también se observa que la deshidratación osmótica asistida con HHP influye en la composición nutricional y las características de calidad del producto; se ha demostrado la inhibición de microorganismos, lo cual incrementa la vida útil en comparación con las muestras osmodeshidratadas convencionalmente (Dermesonlouoglou *et al.*, 2016, 2017). No obstante, el incremento de HHP puede tener un impacto negativo en el color, pues en el tratamiento de fresa con HHP a 300-500 MPa se generó un mayor oscurecimiento del producto osmodeshidratado, en comparación con las tratadas a 200-300 MPa (Núñez-Mancilla *et al.*, 2013).

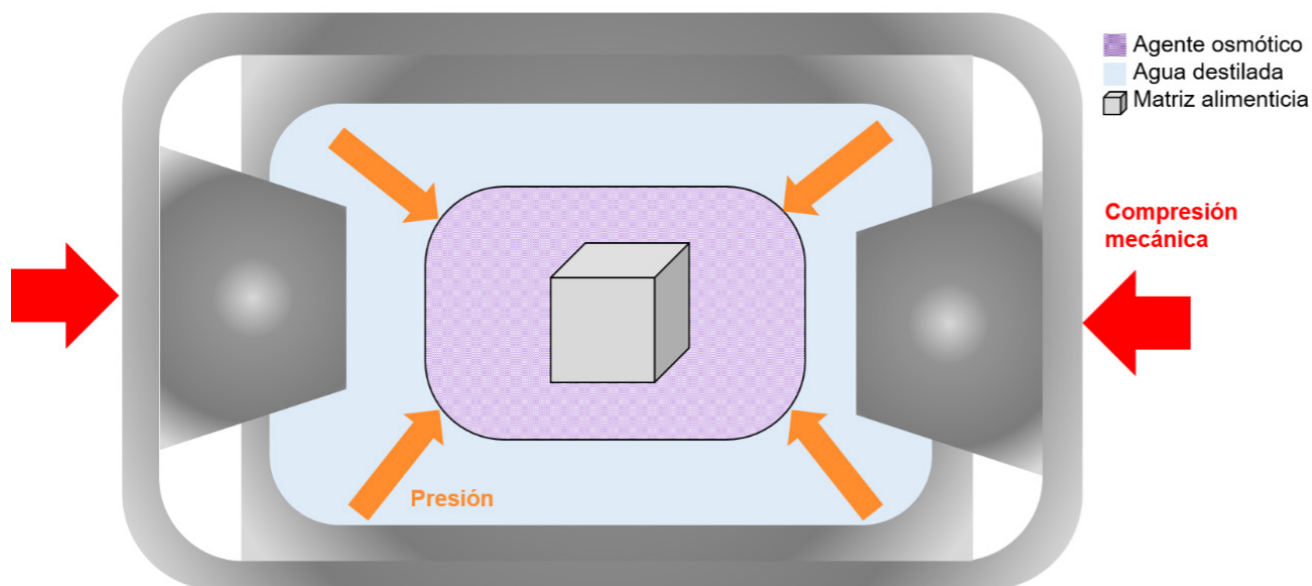
**Tabla III.** Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por altas presiones

Matriz	Variables de proceso	Condiciones de deshidratación osmótica	Conclusiones <sup>a</sup>	Referencias
Durazno ( <i>Prunus persica</i> L.) y albaricoque ( <i>Prunus armeniaca</i> L.)	600 MPa; velocidad de la rampa de 600 MPa / min; temperatura: 25 °C; tiempo de tratamiento: 5 min	50 % glicerol (p / p), 12.5 % eritritol (p / p), 3.5 % NaCl (p / p), 1.5 % CaCl <sub>2</sub> (p / p), 1.25 % glucósidos de esteviol (p / p) y 0.2 % Citrox (p / p); 5 g solución osmótica / g producto; 45 °C; 45 min	El uso de HHP incrementó la dureza de los duraznos y albaricoques osmodeshidratados.	Dermesonlouoglou <i>et al.</i> (2019)
Fresa var. <i>Camarosa</i> ( <i>Fragaria Vesca</i> )	100, 200, 300, 400 y 500 MPa; velocidad de rampa de 1,020 MPa / min; temperatura: 15 °C; tiempo de tratamiento: 10 min; tiempo de descompresión: 5 s	40 °Brix de sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto	Los polisacáridos aumentaron con la presión. La alta presión provoca ondulación de la pared celular, lo que a su vez afecta las propiedades de textura debido a la pérdida de turgencia celular, firmeza e integridad de la pared celular.	Núñez-Mancilla <i>et al.</i> (2014)
	100, 200, 300, 400 y 500 MPa; velocidad de rampa de 1,020 MPa / min; temperatura: 15 °C; tiempo de tratamiento: 10 min; tiempo de descompresión: 5 s	40 °Brix de sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto	El contenido fenólico total aumentó con el incremento en la presión. El contenido de vitamina C no mostró cambios con el aumento de la presión. Después de 400 MPa no se observaron incrementos en la transferencia de masa.	Núñez-Mancilla <i>et al.</i> (2013)
	600 MPa; velocidad de la rampa de 600 MPa / min; temperatura: 25 °C; tiempo de tratamiento: 5 min	50 % glicerol (p / p), 12.5 % eritritol (p / p), 1 % glucósidos de esteviol (p / p), 0.2 % ácido ascórbico (p / p), 1.5 % CaCl <sub>2</sub> (p / p), 1 % ácido cítrico (p / p), 0.20 % L-cisteína HCl (p / p) y 0.1 % Citrox (p / p); 5 g de solución osmótica / g producto; 15 - 45 °C, 240 min	El tratamiento no modificó los parámetros de transferencia de masa. La vida útil se prolongó significativamente tanto para DO-HHP como para DO (hasta 10 y 4 meses a 5 °C, respectivamente).	Dermesonlouoglou <i>et al.</i> (2016)
Jitomate var. <i>Heinz 3402</i>	600 MPa; velocidad de la rampa de 600 MPa / min; temperatura: 25 °C; tiempo de tratamiento: 5 min	50 % glicerol (p / p), 12.5 % eritritol (p / p), 3.5 % NaCl (p / p), 1.5 % CaCl <sub>2</sub> (p / p) y 0.2 % Citrox (p / p); 5 g solución osmótica / g producto; 35 °C, 90 min	La vida útil de las muestras DO y DO-HHP se estimó en 77 y 181 días, respectivamente, a 5 °C.	Dermesonlouoglou <i>et al.</i> (2017)

**Tabla III.** Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por altas presiones (continuación)

Matriz	Variables de proceso	Condiciones de deshidratación osmótica	Conclusiones <sup>a</sup>	Referencias
Mango ( <i>Mangifera indica</i> L.) maduro e inmaduro	300 MPa; velocidad de la rampa de 402 MPa / min; temperatura: 50 °C; tiempo de tratamiento: 3 - 5 min; tiempo de descompresión: 10 s	60 °Brix de sacarosa, 2 % lactato de calcio ( <i>p / p</i> ) o 0.0048 % PME <sup>b</sup> (ml / g), 4 g solución osmótica / g producto, 30 - 240 min	Resultó favorable usar mango inmaduro y aplicar DO-HHP sin PME para obtener una ganancia de solutos alta y una pérdida de agua baja (mango confitado).	Sulistyawati <i>et al.</i> (2018)
Plátano ( <i>Musa cavendishii</i> )	200 MPa; velocidad de la rampa de 200 MPa / min; temperatura: 25 °C; tiempo de tratamiento: 5 min; tiempo de descompresión: 10 s	30 - 70 °Brix de sacarosa, 5 g solución osmótica / g producto, 30 - 70 °C, 480 min, 120 rpm	Se registró una mayor pérdida de agua (22 %) y ganancia de solutos (50.5 %) en comparación con las muestras sin tratar, esto se atribuyó a la ruptura de la pared celular por la presión aplicada.	Verma <i>et al.</i> (2014)

<sup>a</sup> HHP: Altas presiones hidrostáticas; DO: deshidratación osmótica; DO-HHP: deshidratación osmótica asistida con altas presiones hidrostáticas; <sup>b</sup> PME: pectinmetilesterasa.

**Figura 2.**

Representación esquemática de la reducción mecánica de volumen para generar altas presiones.



### 3.2. Pulsos de vacío

La deshidratación osmótica asistida con vacío (DO-PV) consiste en la aplicación de presión de vacío a un sistema sólido-líquido, seguido de la restauración de la presión atmosférica. Durante la aplicación del vacío, el gas o líquido contenido en los poros del producto se elimina. Cuando se restablece la presión atmosférica, la solución externa penetra en el espacio poroso del alimento (Sulistyawati *et al.*, 2018). Esto implica un aumento de la superficie de contacto sólido líquido y, por ende, un incremento de la transferencia de masa (Ahmed *et al.*, 2016).

En la tabla IV se muestran algunas aplicaciones del proceso de DO-PV. La mayoría de estos estudios se han aplicado a frutas y hortalizas sumergidas en soluciones osmóticas de sacarosa (30-70 °Brix); las presiones de vacío van de 0.0099 a 0.0253 MPa, y los tiempos de aplicación del vacío oscilan en-

tre los 2 y los 20 minutos. Estos estudios demostraron que el incremento de la presión de vacío durante la DO-PV ayuda a obtener productos con menor contenido de agua y menor ganancia de solutos (Şahin y Öztürk, 2018). Asimismo, la velocidad de transferencia de masa se ve afectada por la porosidad de la matriz alimenticia (Mújica-Paz *et al.*, 2003). Además, la DO-PV puede mejorar la composición nutricional o la calidad del producto osmodeshidratado, ya que algunos estudios han encontrado que permite impregnar probióticos en manzana mediante el incremento de solutos presentes en soluciones de sacarosa y emulsiones ( $W_1/O/W_2$ ) formadas con *Lactobacillus rhamnosus* LC70/aceite de semillas de uva/proteína de suero de leche (Flores- Andrade *et al.*, 2017). También puede mejorar el color, la textura y el sabor de alimentos secos (Ramya y Jain, 2017; An *et al.*, 2019).

**Tabla IV.** Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por pulsos de vacío

Matriz	Variables de proceso		Condiciones de deshidratación osmótica	Conclusiones <sup>a</sup>	Referencias
	Presión de vacío	Tiempo			
Higos ( <i>Ficus carica</i> L.)	$0.99 \times 10^{-2}$ MPa (74 mmHg)	5 min	40 - 60 °Brix de sacarosa, 40 °C, 10 g solución osmótica / g producto, 240 min	El aumento de la concentración de sacarosa incrementó la pérdida de agua y la ganancia de solutos.	De Mello <i>et al.</i> (2019)
	$1.31 \times 10^{-2}$ MPa (98 mmHg), 15 min	15 min	50 °Brix de sacarosa, 50 °C, 4 g solución osmótica / g producto, 165 min	El uso de deshidratación osmótica asistida por PV acortó el periodo de secado, en tanto favoreció la eliminación de agua y resultó en una menor ganancia de solutos.	Şahin y Öztürk (2016)
	$2.53 \times 10^{-2}$ MPa (190 mmHg)	15 min	50 °Brix de sacarosa, 50 °C, 4 g solución osmótica / g producto, 180 min	La deshidratación osmótica asistida por PV redujo el tiempo de secado, sin embargo, las muestras tratadas con este proceso se encogieron más (3 %) que las muestras sin tratamiento.	Şahin y Öztürk (2018)
Manzana var. <i>Ligol</i>	0.008, 0.0067 y 0.080 MPa (60, 502.5 y 600 mmHg)	2 min	30, 50 y 70 °Brix de sacarosa, 5 g solución osmótica / g producto, 25 °C, 180 min	A mayor presión de vacío, se registró una menor ganancia de sólidos.	Muszyński <i>et al.</i> (2016)

**Tabla IV.** Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por pulsos de vacío (continuación)

Matriz	Variables de proceso		Condiciones de deshidratación osmótica	Conclusiones <sup>a</sup>	Referencias
	Presión de vacío	Tiempo			
Manzana var. <i>Granny Smith</i>	0.0114 MPa (85.4 mmHg)	20 min	9 g de sacarosa / g de emulsión W1 / O / W2 (emulsión agua en aceite, W1 / O se formó con la $9.98 \times 10^8$ UFC de <i>Lactobacillus rhamnosus</i> LC705 / ml y 62 g aceite de semilla de uva; finalmente 30 g de la emulsión W1 / O se dispersó en 70 g de solución de 14 % de concentrado de proteína de suero de leche); 40 - 60 °Brix; 20 g solución osmótica / g producto; 320 min	Se promovió una mayor incorporación de probióticos cuando la ganancia de sólidos aumenta con el tiempo. Asimismo, la deshidratación osmótica asistida con pv produce una mayor impregnación de <i>Lactobacillus rhamnosus</i> respecto al proceso a presión atmosférica ( $7.52 \times 10^7$ - $1.75 \times 10^8$ UFC / g).	Flores-Andrade et al. (2017)
Jengibre chino ( <i>Zingiber officinale Roscoe</i> )	0.013 MPa (97.5 mmHg)	15 min	0.50 g sacarosa y 0.10 g NaCl / g solución, 4 g solución / g producto, 30 °C, 30 min	La deshidratación osmótica asistida con pulsos de vacío permite reducir más de un 80 % la actividad de polifenol oxidasa e incrementa (80 %) la actividad de peroxidasa.	An et al. (2019)
Manzana, mango, melón	0.0135 - 0.067 MPa (101.25 - 505.5 mmHg)	10 min	40 - 60 °Brix de sacarosa, 10 g solución osmótica / g producto, 25 °C, 20 min	La velocidad de transferencia de masa es favorecida en frutas con altos niveles de porosidad (manzana).	Mújica-Paz et al. (2003)
Manzana ( <i>Malus pumila Mill</i> )	0.02 MPa (150 mmHg)	5 y 10 min	30 - 60 °Brix de sacarosa, 10 - 55 °C, 10 g solución osmótica / g producto, 240 min	Las muestras sin presión de vacío tuvieron mayor ganancia de solutos.	Wang et al. (2018)

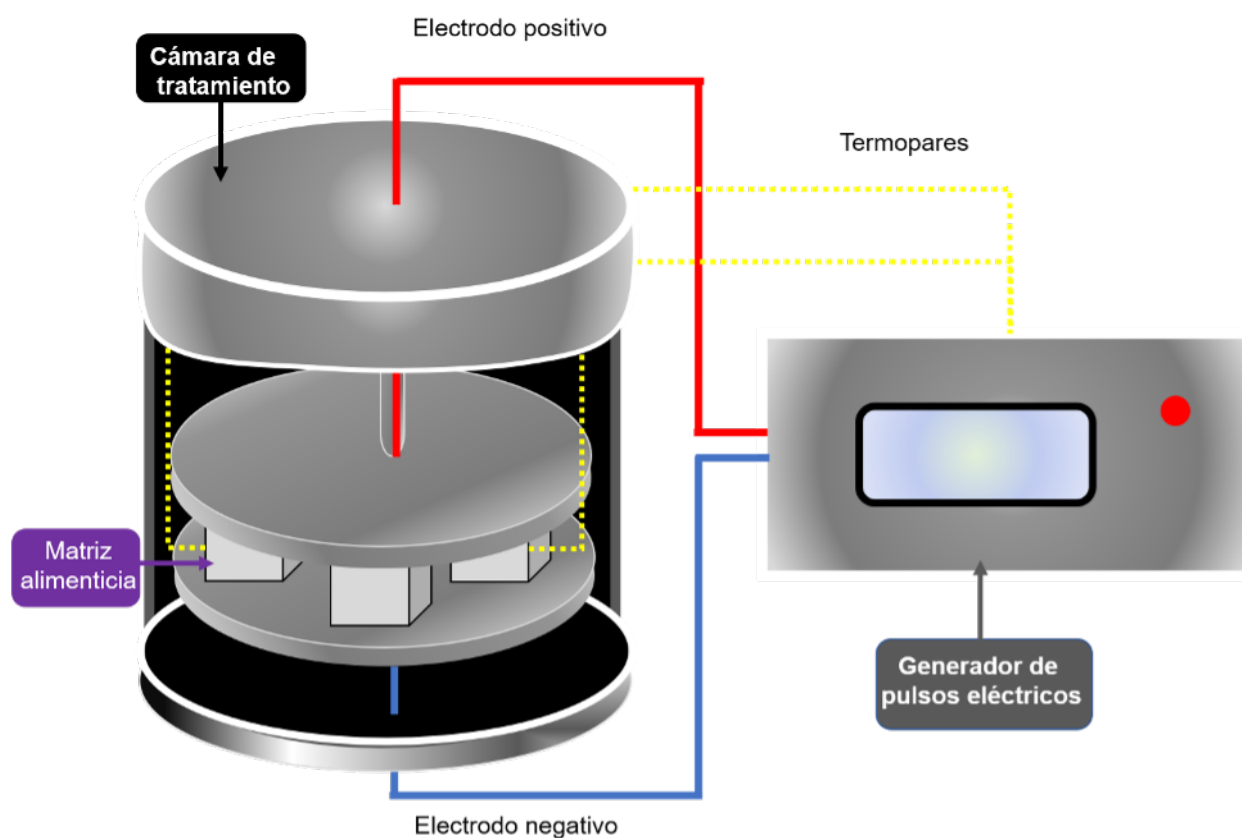
<sup>a</sup> PV: pulsos de vacío; UFC: unidades formadoras de colonia.

### 3.3. Pulsos eléctricos

El tratamiento por campo eléctrico consiste en la aplicación de corriente eléctrica a través de un material alimenticio (figura 3) (Simpson et al., 2015). Este tratamiento puede causar cambios en la permeabilidad de la membrana celular —conformada por una bicapa de fosfolípidos— de frutas y hortalizas, debido a una electroporación o a electrocompresión (Kusnadi y Sastry, 2012). La electroporación se produce cuando el campo eléctrico externo induce cambios conformacionales y una reorganización de

la bicapa fosfolipídica generando poros (Traffano-Schiffo et al., 2016). Mientras que la electrocompresión se produce debido a la acumulación de cargas (electrolitos) en ambos lados de la membrana celular, las cuales se atraen entre sí hasta generar un poro (Traffano-Schiffo et al., 2017).

El incremento de la permeabilidad de la membrana celular de frutas y hortalizas generado por la aplicación de corriente eléctrica, puede ser causado mediante campos eléctricos pulsados (PEF), campos eléctricos pulsados de intensidad mode-

**Figura 3.**

Representación esquemática del sistema de tratamiento de alimentos sólidos con pulsos eléctricos. Adaptada de Parniakov *et al.* (2016).

rada (MEF) y campos eléctricos pulsado de alta intensidad (HELP) (Yildiz *et al.*, 2016). El método más estudiado es el de PEF (Dermesonlouoglou *et al.*, 2018), en la figura 3 se muestra un esquema representativo (Parniakov *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2020). El método consiste en la aplicación de PEF a través de un material situado entre dos electrodos durante períodos de tiempo muy cortos (de microsegundos a milisegundos) (Traffano-Schiffo *et al.*, 2017). Los electrodos pueden estar en contacto directo con el alimento sólido (a través de placas metálicas o de alambres) o con una solución electrolítica (NaCl) colocada en la cámara de tratamiento, esta solución permitirá una mayor superficie de contacto de la corriente eléctrica con el alimento sólido (Tylewicz *et al.*, 2017).

Las modificaciones en la permeabilidad de la membrana celular ocasionadas por PEF han sido de gran ayuda para

mejorar procesos de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de alimentos (Dellarosa *et al.*, 2016). En la tabla V se muestran algunos estudios de la aplicación de PEF en frutas y hortalizas; estos demuestran que el uso de PEF como tratamiento previo a la deshidratación osmótica mejora la velocidad de transferencia de masa. Específicamente, se reportaron mejoras en la pérdida de agua (Traffano-Schiffo *et al.*, 2016; Nowacka, Wiktor *et al.*, 2019) y reducciones en el tiempo de deshidratación osmótica (Yu *et al.*, 2017). En lo que respecta a ganancia de sólidos, algunos estudios encontraron que los PEF pueden incrementarla (Amami *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2018) o reducirla (Traffano-Schiffo *et al.*, 2017; Nowacka, Wiktor *et al.*, 2019), dependiendo del tipo de agente osmótico (Tylewicz *et al.*, 2017) o del número de pulsos (Nazari *et al.*, 2019).

**Tabla V.** Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por campo eléctrico pulsado

Matriz	Variables de proceso	Condiciones de deshidratación osmótica	Conclusiones <sup>a</sup>	Referencias
Arándano ( <i>Vaccinium oxycoccus</i> )	Intensidad del campo: 5.5 kV / cm Número de pulsos: 10 Intervalo entre pulsos: 2 segundos Frecuencia: 0.5 Hz	0.61 y 0.30 °Brix de sacarosa, 0.001 g glicósidos de esteviol / g solución, 4 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 4,320 min	El uso de PEF promovió la aceleración de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica y redujo el contenido de sacarosa en los productos finales.	Nowacka, Wiktor <i>et al.</i> (2019)
Blueberries ( <i>Vaccinium spp.</i> )	Intensidad del campo: 3 kV / cm 200 pulsos / segundos Duración del pulso: 1 µs Duración: 5 min Temperatura: 20 °C	0.70 g sacarosa y 0.00025 g de NaCl / g producto, 2 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 200 rpm	El tratamiento con PEF redujo el tiempo de deshidratación osmótica de 130 a 48 h e incrementó la pérdida de agua y ganancia de solutos.	Yu <i>et al.</i> (2018)
Fresa var. <i>Alba</i>	Intensidad del campo: 0.1 - 0.4 kV / cm Duración del pulso: 100 µs Frecuencia: 100 Hz Temperatura: 25 °C Solución: NaCl	40 °Brix de sacarosa o trehalosa, 4 g solución osmótica / g producto, 25 °C, 120 min	Al aplicar una intensidad de campo eléctrico más baja (100 V / cm) se registró un aumento en la pérdida de agua tras una hora de deshidratación osmótica, para las fresas deshidratadas en solución de sacarosa (12 %) y trehalosa (6 %). El tratamiento de PEF incrementó la ganancia de solutos para los experimentos con sacarosa, pero con trehalosa se redujeron.	Tylewicz <i>et al.</i> (2017)
Kiwi var. <i>Hayward</i> , <i>Actinidia deliciosa</i>	Intensidad del campo: 0.1, 0.25 y 0.4 kV / cm Número de pulsos: 60 Intervalo entre pulsos: 100 µs Frecuencia: 100 Hz Tiempo de repetición: 10 ms Temperatura: 25 °C	61.5 °Brix de sacarosa, 4 g solución / g producto, 25 °C, 0 - 120 min	El tratamiento con PEF incrementó la pérdida de agua y redujo la ganancia de sacarosa durante la deshidratación osmótica.	Traffano-Schiffo <i>et al.</i> (2017)
Manzana	Intensidad del campo: 1, 1.5 y 2 kV / cm Número de pulsos: 8, 16 y 24 Duración del pulso: 0.02, 0.026 y 0.05 s Temperatura constante	50 °Brix de sacarosa, 20 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 140 rpm	La duración del pulso tuvo menor efecto en la pérdida de agua y ganancia de sólidos en comparación con la intensidad de campo y el número de pulsos. La aplicación de 8 - 16 pulsos durante el proceso DO-PEF incrementó los parámetros de transferencia de masa hasta los 24 pulsos, a partir de entonces estos se reducen.	Nazari <i>et al.</i> (2019)

**Tabla V.** Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por campo eléctrico pulsado (continuación)

Matriz	Variables de proceso	Condiciones de deshidratación osmótica	Conclusiones <sup>a</sup>	Referencias
Manzana	Intensidad del campo: 0.90 kV / cm Número de pulsos: 750 Intervalo entre pulsos: 100 µs	65 °Brix de sacarosa, 3 g solución osmótica / g producto, 25 °C, 1,500 rpm	Durante la deshidratación osmótica, las muestras tratadas con PEF mostraron una mayor pérdida de agua (4 - 35 %) y ganancia de solutos (15 - 60 %) que las muestras sin tratar.	Amami <i>et al.</i> (2014)
Zanahoria	Intensidad del campo: 0.30 kV / cm Número de pulsos: 500 Intervalo entre pulsos: 100 µs			
Plátano	Intensidad del campo: 0.60 kV / cm Número de pulsos: 500 Intervalo entre pulsos: 100 µs Temperatura: 60 y 80 °C			

<sup>a</sup> PEF: campo eléctrico pulsado, DO-PEF: deshidratación osmótica asistida por campo eléctrico pulsado.

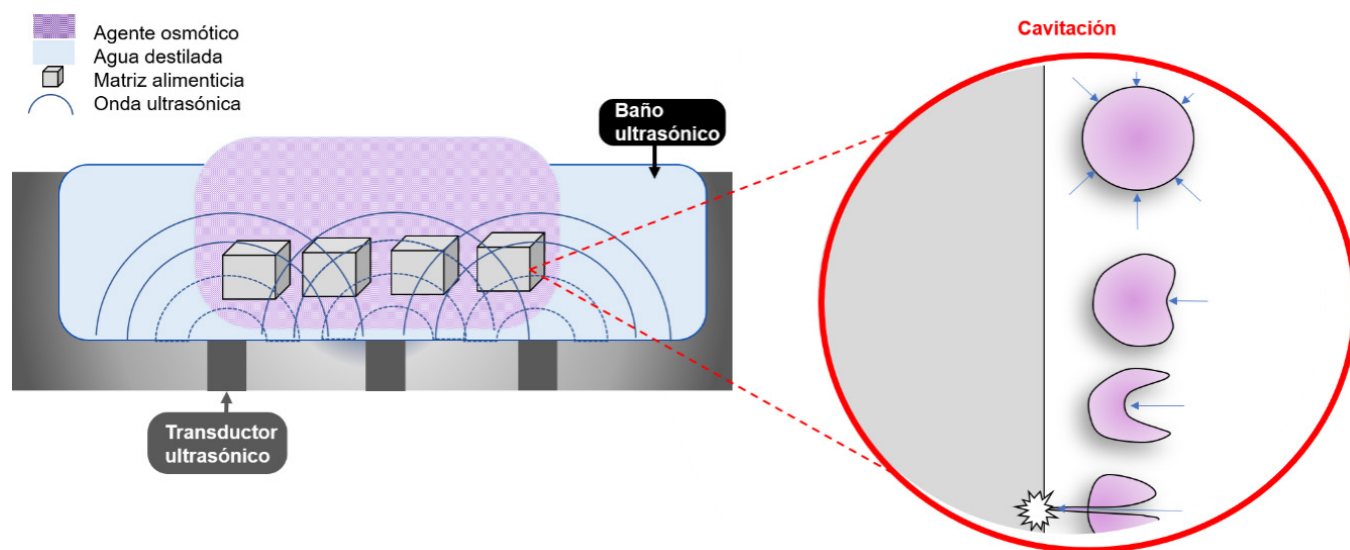
3.4. Ultrasonido y osmo-sonicación

El ultrasonido es un tipo de energía sonora emitida por ondas con frecuencias mayores a 20 kHz. Se clasifican en ondas de alta frecuencia (baja energía e intensidad, frecuencias mayores a 100 kHz) y baja frecuencia (alta energía e intensidad, frecuencias de 20-100 kHz) (Fernandes y Rodrigues, 2017). La cavitación —desarrollo e implosión de burbujas de gas—, que resulta de un ultrasonido con energía de baja frecuencia y alta intensidad, produce una variedad de efectos, entre ellos la regulación del contenido enzimático (activación o inactivación), y la mejora de la tasa de transferencia de masa y energía durante procesos de secado, congelación y deshidratación (Onwude *et al.*, 2017).

Aplicar ultrasonido antes de la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas tiene como objetivo generar cambios en la estructura del tejido celular para modificar la transferencia

de masa. El tratamiento consiste en sumergir el alimento sólido en agua destilada (deshidratación osmótica asistida con ultrasonido, DO-US), o bien, en una solución osmótica de menor o igual concentración al proceso de deshidratación osmótica (osmo-sonicación) (Bozkir *et al.*, 2019; Osae *et al.*, 2019). Posteriormente, a través de este medio líquido se propagan ondas ultrasónicas (emitidas, ya sea por un transductor de sonda, o en baño) (figura 4). Durante este tratamiento se originan dos fenómenos: el «efecto esponja» (compresión y expansión del material) y la formación de cavitaciones (desarrollo e implosión de burbujas de gas en el medio líquido) (Nowacka *et al.*, 2018). Las burbujas formadas debido a las cavitaciones implosionan (figura 4), generando una presión sobre la superficie de la matriz alimenticia, permitiendo así la remoción de partículas de agua fuertemente ligadas y la creación de microcanales que





**Figura 4.**

Representación esquemática del sistema de tratamiento de osmo-sonicación de alimentos y colapso asimétrico de burbujas de vapor causadas por ultrasonido. Adaptada de Miano *et al.* (2017).

mejoran la transferencia de masa (Miano *et al.*, 2017). Nowacka, Tylewicz, Laghi, Dalla Rosa y Witrowa-Rajchert (2014) demostraron que se requiere de al menos 10 minutos de tratamiento para la formación de microcanales.

En la tabla VI se muestran algunas aplicaciones de la deshidratación osmótica asistida por ultrasonido y osmo-sonicación de frutas y hortalizas. Se ha registrado que el incremento de la frecuencia ultrasónica y el tiempo de tratamiento reducen la actividad de agua, puesto que generan una mayor pérdida (Kek *et al.*, 2013; Amami *et al.*, 2017; Allahdad *et al.*, 2019; Bozkir *et al.*, 2019). Sin embargo, durante las primeras etapas del proceso se observan pérdidas de negativas de agua, es decir, el producto

absorbe agua (Dias da Silva *et al.*, 2016; Allahdad *et al.*, 2019). Asimismo, durante la DO-US puede ocurrir ganancia de sólidos negativa debido a la lixiviación de sólidos (Dias da Silva *et al.*, 2016). Por otro lado, el incremento de la frecuencia ultrasónica, la concentración de la solución osmótica (osmo-sonicación) y el tiempo de proceso resultaron en un aumento de sólidos (García-Noguera *et al.*, 2014; Nowacka *et al.*, 2014). Además de los beneficios que tiene el uso de ultrasonido al proceso de deshidratación osmótica, estos tratamientos ayudan a aumentar los compuestos bioactivos, inactivar enzimas, así como mejorar el color y la textura del producto final (Kek *et al.*, 2013; García-Noguera *et al.*, 2014; Osae *et al.*, 2019).

**Tabla VI.** Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por osmo-sonicación o ultrasonido

Matriz	Tipo de tratamiento ultrasónico	Variables de proceso a	Condiciones de deshidratación osmótica	Conclusiones	Referencias
Arilos de granada	Osmo-sonicación	f = 25 y 40 kHz P = 100 W T = 30 °C t = 10 - 80 min	50 °Brix de sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto, 30 °C, 70 rpm	La pérdida de agua aumentó con el tiempo de sonicación. Las muestras a 25 kHz mostraron la mayor cantidad de solutos filtrados; la menor actividad del agua se alcanzó a 40 kHz.	Allahdad <i>et al.</i> (2019)
Caqui ( <i>Diospyros kaki</i> L.)	Osmo-sonicación	f = 35 kHz P = 480 W T = 30 °C t = 10, 20 y 30 min Medio: 45 °Brix de sacarosa	70 °Brix de sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto, 30 °C, 100 rpm	El tratamiento incrementó la pérdida de agua y ganancia de solutos; además esto se ve influenciado por el tiempo de sonicación y la frecuencia ultrasónica.	Bozkir <i>et al.</i> (2019)
Cranberry ( <i>Vaccinium oxycoccus</i> )	Osmo-sonicación	f = 35 y 130 kHz t = 10 - 80 min	40 - 60 °Brix sacarosa y 0 - 0.08 g NaOH / g solución, 10 g de solución osmótica / g, 25 °C, 150 rpm	El incremento de la frecuencia ultrasónica disminuyó la dureza y actividad de agua del producto.	Shamaei <i>et al.</i> (2012)
	Osmo-sonicación y ultrasonido	f = 21 kHz P = 180 W (I = 3.6 W / g) t = 30 min Medio: 4 g agua / g producto	0.62 g sacarosa / g solución, 0.3 g sacarosa con 0.001 g glicósido de esteviol / g solución y 0.4 g trehalosa / g solución, 4 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 4,320 min	Los parámetros de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica fueron influenciados por la aplicación de ultrasonido y osmo-sonicación y por la actividad de agua de las soluciones osmóticas. La osmo-sonicación permitió obtener mayor pérdida de agua.	Nowacka <i>et al.</i> (2018)
Fresa var. Camarosa	Osmo-sonicación	f = 25 kHz P = 60 W T = 30 °C t = 10 - 45 min	25 y 50 °Brix de sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto, 30 °C	El pretratamiento con ultrasonido y la deshidratación osmótica mejoraron el color en las muestras de fresa, especialmente después de una exposición ultrasónica prolongada y la aplicación de altas concentraciones de sacarosa con el pretratamiento.	García-Noguera <i>et al.</i> (2014)
	Osmo-sonicación	f = 40 kHz I = 0.20 W / m <sup>2</sup> T = 20 - 40 °C t = 10, 20 y 30 min	32.5 y 65 °Brix de sacarosa, 20 - 40 °C	La pérdida de agua aumentó con a la par del tiempo de sonicación; el corto tiempo de sonicación minimizó las pérdidas de color.	Amami <i>et al.</i> (2017)
Guayaba	Osmo-sonicación y ultrasonido	Sonicación indirecta: f = 0 - 25 kHz P = 1, 1.75 y 2.5 kW t = 20 - 60 min	35 y 70 °Brix	La energía y amplitud del ultrasonido y el tiempo de osmo-sonicación incrementaron la pérdida de agua y ganancia de sólidos.	Kek <i>et al.</i> (2013)
		Sonicación indirecta: f = 20 kHz P = 400 W A = 15, 25 y 35 % t = 6 - 20 min		La sonicación indirecta mostró mejor aceptación sensorial (color).	

**Tabla VI.** Aplicaciones del proceso de deshidratación osmótica asistido por osmo-sonicación o ultrasonido (continuación)

Matriz	Tipo de tratamiento ultrasónico	Variables de proceso a	Condiciones de deshidratación osmótica	Conclusiones	Referencias
Melón ( <i>Cucumis melo</i> L.) var. <i>cantalupensis</i> Naud	Osmo-sonicación y ultrasonido	f = 25 kHz I = 4870 W / m <sup>2</sup> T = 30 °C t = 10, 20 y 30 min	50 °Brix sacarosa, 4 g solución osmótica / g producto, 30 °C	Al comienzo del proceso, la deshidratación osmótica asistida con ultrasonido presentó pérdidas de agua negativas (el producto absorbió agua) y la ganancia de sólidos incrementó a la par del tiempo de inmersión.	Dias da Silva et al. (2016)
Rebanadas de jengibre ( <i>Zingiber officinale</i> Roscoe)	Osmo-sonicación y ultrasonido	f = 33 kHz P = 600 W T = 30 °C t = 30 min <i>Para ultrasonido</i>  Medio: 10 g agua / g producto <i>Para osmo-sonicación</i> Medio: 10 g solución osmótica / g producto	20 °Brix de sacarosa, 10 g solución osmótica / g producto, 30 °C	El tratamiento de osmo-sonicación ayuda a inactivar las enzimas polifenol oxidasa y peroxidasa.	Osae et al. (2019)
Zanahoria negra ( <i>Daucus carota</i> ssp. <i>sativus</i> )	Osmo-sonicación	f = 37 kHz P = 550 W T = 40 °C t = 5, 10 y 15 min Medio: 45 °Brix de sacarosa	0.05, 0.1 y 0.15 g NaCl / g producto, 4 g solución osmótica / g producto, 40 °C, 125 rpm	La osmo-sonicación promovió la rotura de la estructura de los tejidos e incrementó la transferencia de masa.	Sucheta et al. (2019)

<sup>a</sup> f: frecuencia ultrasónica; P: potencia; I: intensidad; T: temperatura; t: tiempo de tratamiento; A: amplitud de onda.

#### 4. Modelos y cinéticas de transferencia de masa durante el proceso de deshidratación osmótica

Al comienzo del proceso de deshidratación osmótica, como la diferencia entre la concentración de solutos de la solución osmótica y de la matriz alimenticia es grande, la pérdida de agua es muy rápida. Conforme el contenido de agua de la matriz alimenticia se reduce, la diferencia de concentraciones (presión osmótica) se vuelve más pequeña, por lo que la velocidad de transferencia disminuye hasta alcanzar un estado de equilibrio (Salim et al., 2016). Como en la deshidratación osmótica ocurre un intercambio de agua y soluto, el proceso de deshidratación osmótica puede evaluarse mediante los parámetros de pérdida de agua, *PA* y ganancia de solutos, *GS* (Assis et al., 2018), los cuales se pueden calcular con las siguientes ecuaciones (Allahdad et al., 2019):

$$PA = \frac{m_{w0} - m_{wDO}}{m_{p0}}$$

**Ecuación 1.**

$$GS = \frac{m_s - m_{s0}}{m_{p0}}$$

**Ecuación 2.**

Donde  $PA$  es la pérdida de agua del producto (g agua/g producto fresco);  $GS$ , la ganancia de solutos (g soluto/g producto fresco);  $m_{w0}$ , la masa de agua inicial (g);  $m_{wDO}$ , la masa de agua del producto osmodeshidratado (g);  $m_{p0}$ , la masa del producto fresco (g);  $m_s$ , la masa del producto osmodeshidratado seco; y  $m_{s0}$  corresponde a la masa del producto fresco seco (g).

Los modelos de transferencia de masa para la deshidratación osmótica desprecian el flujo de soluto proveniente de la matriz alimenticia, ya que es muy pequeño comparado con la  $PA$  y  $GS$  (Pacheco-Angulo *et al.*, 2016). Los modelos que permiten predecir las cinéticas de  $PA$  y  $GS$  se clasifican en empíricos, semi-empíricos y fenomenológicos (Muñiz-Becerá *et al.*, 2017). En la tabla VII se presentan algunos modelos usados para describir estas curvas de proceso. Los modelos empíricos y semi empíricos dependen de las condiciones experimentales, ya que únicamente son válidos para las condiciones en que se calcularon. Además, algunos permiten predecir los valores de equilibrio con pocos puntos experimentales de la cinética (Azuara *et al.*, 1992; Alam *et al.*, 2019), por lo que, generalmente, se utili-

zan para calcular el estado de equilibrio para resolver algunos modelos fenomenológicos. Estos modelos tienen en cuenta los mecanismos del proceso, usan geometrías clásicas y se basan en la segunda ley de Fick para representar el mecanismo de difusión (Assis *et al.*, 2016).

En la tabla VIII vemos algunos ejemplos de la difusividad de transferencia de masa de frutas y hortalizas sometidas a deshidratación osmótica asistida por pulsos de vacío, altas presiones hidrostáticas, campos eléctricos pulsados y osmosonificación. Se muestra un incremento en la difusividad de transferencia de masa en los procesos de deshidratación osmótica asistida por estos métodos no térmicos. Asimismo, se observa un incremento en la difusividad de transferencia de masa debido a soluciones osmóticas con menor peso molecular (Dash *et al.*, 2019), debido al incremento en la concentración del soluto presente en la solución osmótica (George *et al.*, 2016; De Jesus Junqueira *et al.*, 2018) o al aumentar la magnitud del tratamiento no térmico (HHP y PEF) (Simpson *et al.*, 2015; Dermesonlouoglou *et al.*, 2016; Luo *et al.*, 2018; Dash *et al.*, 2019).

**Tabla VII.** Modelos matemáticos usados para describir la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas

Modelo		Descripción	Referencias
Nombre	Ecuación <sup>a</sup>		
Modelos empíricos y semi-empíricos			
Modelo de Azuara	$PA = \frac{s_1 \cdot t \cdot PA_e}{1 + s_1}; GS = \frac{s_2 \cdot t \cdot GS_e}{1 + s_2}$	$s_1, s_2$ , constantes de velocidad relativa a la $PA$ y $GS$	Azuara <i>et al.</i> (1992)
Modelo de Peleg	$PA = PA_0 \pm \frac{t}{k_{1,A} + t \cdot k_{2,A}}; GS = GS_0 \pm \frac{t}{k_{1,S} + t \cdot k_{2,S}}$	$k_{1,A}, k_{1,S}$ , constantes de velocidad (s·kg de sólidos secos / kg de agua); $k_{2,A}, k_{2,S}$ , constantes de capacidad (kg de sólidos secos / kg de agua); $PA_0, GS_0$ , $PA$ y $GS$ al inicio del proceso	Peleg (1988)
Modelo de Page	$\frac{PA}{PA_e} = 1 - \exp[-\alpha_A t^{\beta_A}]; \frac{GS}{GS_e} = 1 - \exp[-\alpha_S t^{\beta_S}]$	$\alpha_A, \alpha_S$ , constantes asociadas a $PA$ y $GS$ $\beta_A, \beta_S$ , constantes de Page para $PA$ y $GS$	Alam <i>et al.</i> (2019)
Modelo de Weibull	$\frac{PA}{PA_e} = 1 - \exp\left[\left(\frac{t}{\gamma_A}\right)^{\delta_A}\right]; \frac{GS}{GS_e} = 1 - \exp\left[\left(\frac{t}{\gamma_S}\right)^{\delta_S}\right]$	$\gamma_A, \gamma_S, \delta_A, \delta_S$ , parámetros asociados al modelo de Weibull	Pei <i>et al.</i> (2019)

**Tabla VII.** Modelos matemáticos usados para describir la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas (continuación)

Modelo		Descripción	Referencias
Nombre	Ecuación <sup>a</sup>		
Modelos fenomenológicos obtenidos de la segunda ley de Fick			
Solución analítica de Crank	$\psi_i = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n + 1)^2} \exp \left[ (2n + 1)^2 \frac{\pi^2 D_i \times t}{4 l^2} \right]$	Geometría: placa plana; <i>l</i> , longitud característica (m); <i>D<sub>i</sub></i> , difusividad de transferencia de masa (m² / s); <i>i</i> = <i>A</i> o <i>S</i> ; <i>A</i> = agua; <i>S</i> = solutos; $\psi_{i=A} = 1 - PA_e / PA$ ; $\psi_{i=S} = 1 - GS_e / GS$ ; <i>n</i> , número de nodos	Muñiz-Becerá et al. (2017)
	$\psi_i = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[ n^2 \frac{D_i \times t}{r^2} \right]$	Geometría: esférica; <i>r</i> , radio (m); <i>t</i> , tiempo (s); <i>D<sub>i</sub></i> , difusividad de transferencia de masa (m² / s); <i>i</i> = <i>A</i> o <i>S</i> ; <i>A</i> = agua; <i>S</i> = solutos; $\psi_{i=A} = 1 - PA_e / PA$ ; $\psi_{i=S} = 1 - GS_e / GS$ ; <i>n</i> , número de nodos	

<sup>a</sup>  $PA$ : pérdida de agua (g agua / g producto fresco);  $GS$ : ganancia de solutos (g solutos / g producto fresco);  $t$ : tiempo de inmersión (s);  $PA_e$  (g agua / g producto fresco);  $GS_e$  (g solutos / g producto fresco);  $PA$ ;  $GS$  en el equilibrio.

**Tabla VIII.** Difusividad de transferencia de masa de frutas y hortalizas sometidas a proceso de deshidratación osmótica asistido por pulsos de vacío, altas presiones, tratamiento eléctrico y osmo-sonicación

Matriz (geometría)	Condiciones de proceso		Difusividad × 10 <sup>9</sup> (m <sup>2</sup> / s)				Referencias
	Tratamiento	Deshidratación osmótica	Agua / soluto				
Altas presiones hidrostáticas (HHP)							
Rebanadas de <i>Zingiber officinale</i> Roscoe (placa plana)	Presión: 200 - 600 MPa Tiempo de tratamiento: 0.25 - 15 min	Agente osmótico: glucosa, fructosa y sacarosa Concentración de agente osmótico: 60 °Brix Relación agente osmótico y matriz: 4 g agente osmótico / g producto Temperatura: 40 °C	0.322	/	0.199	glucosa	Dash et al., (2019)
			0.362	/	0.165	fructosa	
			0.396	/	0.396	sacarosa	
			2.277	/	1.730	glucosa, HHP	
			-		-		
			3.725	2.608			
			2.618	/	1.483	fructosa, HHP	
			-		-		
			4.027	2.291			
2.890	/	1.283	sacarosa, HHP				
-		-					
4.293	4.293						



**Tabla VIII.** Difusividad de transferencia de masa de frutas y hortalizas sometidas a proceso de deshidratación osmótica asistido por pulsos de vacío, altas presiones, tratamiento eléctrico y osmo-sonicación (continuación)

Matriz (geometría)	Condiciones de proceso		Difusividad × 10 <sup>9</sup> (m <sup>2</sup> / s)				Referencias
	Tratamiento	Deshidratación osmótica	Agua / soluto				
Rebanadas de manzana (placa plana)	Presión: 400 MPa Tiempo de tratamiento: 10 min	Agente osmótico: jugo de kokum (kk) y una mezcla de sacarosa y kokum (ss-kk) Concentración de agente osmótico: 10, 30 y 50 °Brix Relación agente osmótico y matriz: 3 g agente osmótico / g producto Temperatura: 40 °C	1.58	/	0.22	kk	George <i>et al.</i> (2016)
			1.48	/	0.23	kk-ss	
			-		-		
			4.84		1.91		
			2.13	/	0.23	kk, HHP	
Cilindros de ciruela china, <i>Prunus mume</i> Siebet Zucc (cilindro infinito)	Presión: 50, 100, 200 y 400 MPa Tiempo de tratamiento: 10 min	Agente osmótico: sacarosa Concentración de agente osmótico: 40 °Brix Relación agente osmótico y matriz: 20 g agente osmótico / g producto Temperatura: 22 °C Tiempo: 360 min	2.63	/	0.25 -	kk-ss, HHP	Luo <i>et al.</i> (2018)
			-		2.97		
			19.20				
			0.153	/	-	-	
			0.268	/	-	HHP	
Pulsos de vacío (PV)							
Rodajas de berengena, <i>Solanum melongena</i> L. (placa plana)	Presión de vacío: 108.8 mmHg Tiempo: 10 min	Agente osmótico: 10 % NaCl; 7.5 % NaCl + 2.5 % KCl; 7 % NaCl + 2.5 % KCl + 0.5 % CaCl <sub>2</sub> (1); y 5 % NaCl + 4.0 % KCl + 1. % CaCl <sub>2</sub> (2) Relación agente osmótico y matriz: 10 g agente osmótico / g producto Temperatura: 30 °C Tiempo: 10 - 360 min	0.434	/	0.255	NaCl	De Jesus Junqueira <i>et al.</i> (2017)
			0.459	/	0.257	NaCl : KCl	
			0.453	/	0.312	NaCl : KCl : CaCl <sub>2</sub> (1)	
			0.411	/	0.305	NaCl : KCl : CaCl <sub>2</sub> (2)	
			0.504	/	0.325	NaCl - PV	
			0.546	/	0.287	NaCl : KCl - PV	
			0.533	/	0.355	NaCl : KCl : CaCl <sub>2</sub> (1) - PV	
			0.499	/	0.111	NaCl : KCl : CaCl <sub>2</sub> (2) - PV	
Rebanadas de manzana var. <i>Granny Smith</i> (placa plana)	Presión de vacío: 0.0114 MPa (85.4 mmHg) Tiempo: 20 min	Agente osmótico: 9 g de sacarosa / g de emulsión W <sub>1</sub> / O / W <sub>2</sub> (la emulsión agua en aceite se formó con la 9.98 × 10 <sup>8</sup> UFC de <i>Lactobacillus rhamnosus</i> LC705 / ml y 62 g aceite de semilla de uva; finalmente 30 g de la emulsión W <sub>1</sub> / O se dispersó en 70 g de solución de 14 % de concentrado de proteína de suero de leche) Concentración: 40 - 60 °Brix Relación agente osmótico y matriz: 20 g agente osmótico / g producto Tiempo: 320 min	0.163	/	0.57	sin tratar	Flores-Andrade <i>et al.</i> (2017)
			-		-		
			0.241		0.744		
			0.239	/	0.853	PV	
			0.301		1.548		

**Tabla VIII.** Difusividad de transferencia de masa de frutas y hortalizas sometidas a proceso de deshidratación osmótica asistido por pulsos de vacío, altas presiones, tratamiento eléctrico y osmo-sonicación (continuación)

Matriz (geometría)	Condiciones de proceso		Difusividad × 10 <sup>9</sup> (m <sup>2</sup> / s)				Referencias
	Tratamiento	Deshidratación osmótica	Agua / soluto				
Campo eléctrico pulsado (PEF)							
Discos de manzana var. <i>Jonagold</i> (discos de espesor infinito)	Intensidad de campo eléctrico: 800 V / cm Número de pulsos: 10 Duración del pulso: 100 μs Intervalo entre pulsos: 100 ms Tiempo de relajación: 10 s Energía específica de consumo: 12 kJ / kg Temperatura constante	Agente osmótico: 0.20 y 0.60 g glicerol / g jugo de manzana Relación agente osmótico y matriz: 20 g agente osmótico / g producto Temperatura: 20 °C Tiempo: 180 min	0.50 - 0.35	/	0.31 - 0.69	PEF	Parniakov <i>et al.</i> (2016)
Rebanadas de Kiwi var. <i>Hayward</i> (placa plana)	Intensidad de campo eléctrico: 70, 110 y 180 V / cm Número de pulsos: 250 Duración del pulso: 15 μs Frecuencia: 300 Hz Energía específica de consumo: 8, 16.6 y 42.3 kJ / kg Temperatura: 20 °C	Agente osmótico: 0.30 g glicerol, 0.10 g trehalosa, 0.20 maltodextrina, ácido ascórbico, 0.1 g CaCl <sub>2</sub> y 0.002 g ácido cítrico / g solución Relación agente osmótico y matriz: 5 g solución osmótica / g producto Temperatura: 25 - 45 °C Tiempo: 240 min	0.323 - 1.13	/	1.25 - 1.81	sin tratar	Dermeson-louoglou <i>et al.</i> (2016)
			0.653 - 1.87	/	1.51 - 2.90	PEF	
Rebanadas rectangulares de manzana var. <i>Golden delicious</i> (prisma rectangular)	Tratamiento eléctrico Intensidad de campo eléctrico: 20 - 32 V / cm Tiempo: 10 - 30 s Temperatura: 30 °C	Agente osmótico: sacarosa Concentración de agente osmótico: 50 °Brix Temperatura: 40 °C Relación agente osmótico y matriz: 15 g agente osmótico / g producto Velocidad de agitación: 180 rpm	0.0132	/	0.271	sin tratar	Yildiz <i>et al.</i> (2016)
			0.124 - 0.262	/	0.101 - 0.277	PEF-moderado	
Manzana var. <i>Granny Smith</i>	Intensidad de campo eléctrico: 9, 13 y 17 V / cm Voltaje: 70 - 130 V Temperatura: 40 °C	Agente osmótico: sacarosa con sorbato de potasio y CaCl <sub>2</sub> Concentración de agente osmótico: 45 - 65 °Brix con 7 mg sorbato de potasio / L y 1.27 - 1.13 g CaCl <sub>2</sub> / L Temperatura: 40 °C Relación agente osmótico y matriz: 11 g agente osmótico / g producto	0.148 - 0.181	/	-	sin tratar	Simpson <i>et al.</i> (2015)
			0.163 - 0.514	/	-	PEF	
Osmo-sonicación (OUS)							
Mitades de ciruela var. <i>Victoria</i> (semi esfera)	Frecuencia: 25 kHz Tiempo: 30 y 60 min	Agente osmótico: glucosa y sacarosa Concentración de agente osmótico: 0.50 g (glucosa o sacarosa) / g solución Relación agente osmótico y matriz: 4 g agente osmótico / g producto Temperatura: 30 °C Tiempo: 180 min	-	/	17.3	glucosa y sacarosa	Rahaman <i>et al.</i> (2019)
			-	/	17.1 - 19.2	glucosa, OUS	
			-	/	18.5 - 18.6	sacarosa, OUS	

**Tabla VIII.** Difusividad de transferencia de masa de frutas y hortalizas sometidas a proceso de deshidratación osmótica asistido por pulsos de vacío, altas presiones, tratamiento eléctrico y osmo-sonicación (continuación)

Matriz (geometría)	Condiciones de proceso		Difusividad × 10 <sup>9</sup> (m <sup>2</sup> / s)				Referencias
	Tratamiento	Deshidratación osmótica	Agua / soluto				
Cubos de pepino (placa plana)	Frecuencia: 30 y 70 % Tiempo: 20 y 60 min	Agente osmótico: maltodextrina con NaCl	0.004 - 0.012	/  	0.005 - 0.012	ous	Kiani <i>et al.</i> (2018)
		Concentración de agente osmótico: 0.565 g maltodextrina, 0.05 o 0.045 g NaCl / g solución Relación agente osmótico y matriz: 5 g solución osmótica / g producto Temperatura: 25 °C					
Rebanadas de <i>Agaricus bisporus</i> (placa plana)	Frecuencia: 40 kHz Energía: 200 W Temperatura: 30 °C Tiempo: 15 - 75 min	Agente osmótico: sacarosa, glucosa y NaCl Concentración 0.40 - 0.60 g (sacarosa o glucosa) / g de solución 0.10 - 0.20 g NaCl / g de solución Relación agente osmótico y matriz: 10 g agente osmótico / g producto	0.641 - 0.776	/  	0.491 - 0.551	sacarosa, ous	Pei <i>et al.</i> (2019)
			0.703 - 0.908		/	1.038 - 1.111	
			1.291 - 1.948	/  	0.611 - 0.667	NaCl, ous	

CONCLUSIONES Y  
COMENTARIOS FINALES

Se han publicado avances acerca de la modificación de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas, considerando diversos parámetros, métodos no térmicos, modelos y cinéticas de proceso. La mayoría de los estudios indican que la selección de los parámetros óptimos del proceso, como el tiempo, la temperatura, la concentración del agente osmótico o el tipo de tratamiento no térmico, pueden modificar la calidad del producto e incrementar la transferencia de masa. Asimismo, el uso de tratamientos no térmicos y diferentes condiciones de proceso pueden generar frutas u hortalizas con diferente concentración de solutos. Finalmente, el uso de modelos matemáticos, como la segunda ley de Fick, junto con el modelo de Azuara o Page, son de gran ayuda para comprender mejor y predecir los fenómenos de transferencia

de masa de tratamientos no térmicos o diferentes condiciones de proceso.

A pesar de que estas tecnologías son prometedoras para la obtención de productos osmodeshidratados con alta calidad nutricional, no hay estudios que reporten la aplicación de estos métodos no térmicos con agentes osmóticos más complejos (como concentrados de frutas y hortalizas). Asimismo, se requieren mayores estudios que permitan escalar estos procesos a nivel industrial.

AGRADECIMIENTOS

El autor González-Pérez, J. E. agradece a la Universidad de las Americas Puebla (UDLAP) y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) —hoy Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)—, por el apoyo recibido para el financiamiento de sus estudios de posgrado.

## REFERENCIAS

- Ahmed, I., Qazi, I. M. y Jamal, S. (2016). Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 29-43. doi: 10.1016/j.ifset.2016.01.003
- Akharume, F., Smith, A., Sivanandan, L. y Singh, K. (2019). Recent progress on osmo-convective dehydration of fruits. *SDRP Journal of Food Science & Technology*, 4(9), 956-969. doi: 10.25177/JFST.4.9.RA.613
- Alam, M. S., Kaur, M. y Ramya, H. G. (2019). Mass transfer kinetics for osmotic dehydration of kinnow fruit in sugar solution. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 89(1), 361-370. doi: 10.1007/s40011-017-0951-z
- Alfaro, L., Siramard, S., Chouljenko, A. y Sathivel, S. (2018). Effects of liquid nitrogen pretreatment on the osmotic dehydration and quality of cryogenically frozen blueberries (*Vaccinium angustifolium* Ait.). *Food Bioscience*, 22, 165-169. doi: 10.1016/j.fbio.2018.02.006
- Allahdad, Z., Nasiri, M., Varidi, M. y Varidi, M. J. (2019). Effect of sonication on osmotic dehydration and subsequent air-drying of pomegranate arils. *Journal of Food Engineering*, 244, 202-211. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.09.017
- Amami, E., Khezami, L., Jemai, A. B. y Vorobiev, E. (2014). Osmotic dehydration of some agro-food tissue pre-treated by pulsed electric field: impact of impeller's Reynolds number on mass transfer and color. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 26(1), 93-102. doi: 10.1016/j.jksues.2012.10.002
- Amami, E., Khezami, W., Mezrigui, S., Badwaik, L. S., Bejar, A. K., Perez, C. T. y Kechaou, N. (2017). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 36, 286-300. doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.12.007
- An, K., Tang, D., Wu, J., Fu, M., Wen, J., Xiao, G. y Xu, Y. (2019). Comparison of pulsed vacuum and ultrasound osmotic dehydration on drying of Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): Drying characteristics, antioxidant capacity, and volatile profiles. *Food Science & Nutrition*, 7(8), 2537-2545. doi: 10.1002/fsn3.1103
- Assis, F. R., Morais, R. M. S. C. y Morais, A. M. M. B. (2016). Mass transfer in osmotic dehydration of food products: Comparison between mathematical models. *Food Engineering Reviews*, 8(2), 116-133. doi: 10.1007/s12393-015-9123-1
- Assis, F. R., Morais, R. M. S. C. y Morais, A. M. M. B. (2018). Mathematical modelling of the osmotic dehydration of physalis. *Brazilian Journal of Food Technology*, 21. doi: 10.1590/1981-6723.10217
- Azuara, E., Beritain, C. y García, H. (1992). Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. *Journal of Food Science and Technology*, 29, 239-242.
- Barbosa de Lima, A. G., Da Silva, J. V., Pereira, E. M. A., Dos Santos, I. B. y De Lima, W. M. P. B. (2016). Drying of bioproducts: Quality and energy aspects. En J. M. P. Q. Delgado y A. G. Barbosa de Lima (Eds.), *Drying and Energy Technologies* (pp. 1-18). Springer Cham. doi: 10.1007/978-3-319-19767-8\_1
- Bera, D. y Roy, L. (2015). Osmotic dehydration of litchi using sucrose solution: Effect of mass transfer. *Journal of Food Processing & Technology*, 6(7). doi: 10.4172/2157-7110.1000462
- Bozkir, H., Rayman Ergün, A., Serdar, E., Metin, G. y Baysal, T. (2019). Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. *Ultrasonics Sonochemistry*, 54, 135-141. doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.02.006
- Brochier, B., Marczak, L. D. F. y Noreña, C. P. Z. (2015). Osmotic dehydration of yacon using glycerol and sorbitol as solutes: water effective diffusivity evaluation. *Food and Bioprocess Technology*, 8(3), 623-636. doi: 10.1007/s11947-014-1432-5
- Calin-Sánchez, Á., Kharaghani, A., Lech, K., Figiel, A., Carbonell-Barrachina, Á. A. y Tsotsas, E. (2015). Drying Kinetics and Microstructural and Sensory Properties of Black Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) as Affected by Drying Method. *Food and Bioprocess Technology*, 8(1), 63-74. doi: 10.1007/s11947-014-1383-x
- Cano-Lamadrid, M., Lech, K., Michalska, A., Wasilewska, M., Figiel, A., Wojdyło, A. y Carbonell-Barrachina, Á. A. (2017). Influence of osmotic dehydration pre-treatment and combined drying method on physico-chemical and sensory properties of pomegranate arils, cultivar *Mollar de Elche*. *Food Chemistry*, 232, 306-315. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.04.033
- Chandra, S. y Kumari, D. (2015). Recent development in osmotic dehydration of fruit and vegetables: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(4), 552-561. doi: 10.1080/10408398.2012.664830
- Cheng, X., Zhang, M., Adhikari, B. y Islam, M. N. (2014). Effect of power ultrasound

- and pulsed vacuum treatments on the dehydration kinetics, distribution, and status of water in osmotically dehydrated strawberry: a combined NMR and DSC study. *Food and Bioprocess Technology*, 7(10), 2782-2792. doi: 10.1007/s11947-014-1355-1
- Chitrakar, B., Zhang, M. y Adhikari, B. (2019). Dehydrated foods: are they microbiologically safe? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(17), 2734-2745. doi: 10.1080/10408398.2018.1466265
- Cichowska, J., Figiel, A., Stasiak-Różańska, L. y Witrowa-Rajchert, D. (2019). Modeling of osmotic dehydration of apples in sugar alcohols and dihydroxyacetone (DHA) solutions. *Foods (Basel, Switzerland)*, 8(1), 20. doi: 10.3390/foods8010020
- Cichowska, J. y Kowalska, H. (2018). Effect of osmotic pre-treatment and temperature storage conditions on water activity and colour of dried apple. *International Journal of Food Engineering*, 14(2). doi: 10.1515/ijfe-2017-0158
- Ciurzyńska, A., Kowalska, H., Czajkowska, K. y Lenart, A. (2016). Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food. *Trends in Food Science & Technology*, 50, 186-192. doi: 10.1016/j.tifs.2016.01.017
- Dash, K. K., Balasubramaniam, V. M. y Kamat, S. (2019). High pressure assisted osmotic dehydrated ginger slices. *Journal of Food Engineering*, 247, 19-29. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.11.024
- De Jesus Junqueira, J. R., Corrêa, J. L. G., De Mendonça, K. S., De Mello Júnior, R. E. y De Souza, A. U. (2018). Pulsed vacuum osmotic dehydration of beetroot, carrot and eggplant slices: Effect of vacuum pressure on the quality parameters. *Food and Bioprocess Technology*, 11(10), 1863-1875. doi: 10.1007/s11947-018-2147-9
- De Jesus Junqueira, J. R., Corrêa, J. L. G., De Mendonça, K. S., Resende, N. S. y De Barros Vilas Boas, E. V. (2017). Influence of sodium replacement and vacuum pulse on the osmotic dehydration of eggplant slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 10-18. doi: 10.1016/j.ifset.2017.01.006
- De Mello, R. E., Jr., Corrêa, J. L. G., Lopes, F. J., De Souza, A. U. y Da Silva, K. C. R. (2019). Kinetics of the pulsed vacuum osmotic dehydration of green fig (*Ficus carica* L.). *Heat and Mass Transfer*, 55(6), 1685-1691. doi: 10.1007/s00231-018-02559-w
- Dellarosa, N., Ragni, L., Laghi, L., Tylewicz, U., Rocculi, P. y Dalla Rosa, M. (2016). Time domain nuclear magnetic resonance to monitor mass transfer mechanisms in apple tissue promoted by osmotic dehydration combined with pulsed electric fields. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37(C), 345-351. doi: 10.1016/j.ifset.2016.01.009
- Deng, L.-Z., Mujumdar, A. S., Zhang, Q., Yang, X.-H., Wang, J., Zheng, Z.-A., Gao, Z.-J. y Xiao, H.-W. (2019). Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: effects on drying characteristics and quality attributes - a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(9), 1408-1432. doi: 10.1080/10408398.2017.1409192
- Deng, Y. y Zhao, Y. (2008). Effects of pulsed-vacuum and ultrasound on the osmodehydration kinetics and microstructure of apples (Fuji). *Journal of Food Engineering*, 85(1), 84-93. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.07.016
- Dermesonlouoglou, E. K., Angelikaki, F., Giannakourou, M. C., Katsaros, G. J. y Taoukis, P. S. (2019). Minimally processed fresh-cut peach and apricot snacks of extended shelf-life by combined osmotic and high pressure processing. *Food and Bioprocess Technology*, 12(3), 371-386. doi: 10.1007/s11947-018-2215-1
- Dermesonlouoglou, E. K., Bimpilas, A., Andreou, V., Katsaros, G. J., Giannakourou, M. C. y Taoukis, P. S. (2017). Process optimization and kinetic modeling of quality of fresh-cut strawberry cubes pretreated by high pressure and osmosis. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), 1-14. doi: 10.1111/jfpp.13137
- Dermesonlouoglou, E. K., Chalkia, A., Dimopoulos, G. y Taoukis, P. (2018). Combined effect of pulsed electric field and osmotic dehydration pre-treatments on mass transfer and quality of air dried goji berry. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, 106-115. doi: 10.1016/j.ifset.2018.08.003
- Dermesonlouoglou, E. K. y Giannakourou, M. C. (2019). Evaluation and modelling of osmotic pre-treatment of peach using alternative agents in a multiple-component solution. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(3), 1240-1249. doi: 10.1002/jsfa.9296
- Dermesonlouoglou, E. K., Zachariou, I., Andreou, V. y Taoukis, P. S. (2016). Effect of pulsed electric fields on mass transfer and quality of osmotically dehydrated kiwifruit. *Food and Bioprocess Technology*, 100(B), 535-544. doi: 10.1016/j.fbp.2016.08.009
- Dias da Silva, G., Barros, Z. M. P., De Medeiros, R. A. B., De Carvalho, C. B. O., Rupert Brandão, S. C. y Azoubel, P. M. (2016). Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. *LWT*, 74, 114-119. doi: 10.1016/j.lwt.2016.07.039



- El-Aouar, Â. A., Azoubel, P. M., Barbosa, J. L. y Xidieh Murr, F. E. (2006). Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of Food Engineering*, 75(2), 267-274. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.04.016
- Feng, Y., Yu, X., Yagoub, A. E. A., Xu, B., Wu, B., Zhang, L. y Zhou, C. (2019). Vacuum pretreatment coupled to ultrasound assisted osmotic dehydration as a novel method for garlic slices dehydration. *Ultrasonics Sonochemistry*, 50, 363-372. doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.09.038
- Fernandes, F. A. N. y Rodrigues, S. (2017). Osmotic dehydration and blanching: Ultrasonic pre-treatments. En M. Villamiel *et al.* (Eds.), *Ultrasound in Food Processing* (pp. 311-328). Wiley-Blackwell. doi: 10.1002/9781118964156.ch11
- Flores-Andrade, E., Pascual-Pineda, L. A., Alarcón-Elvira, F. G., Rascón-Díaz, M. P., Pimentel-González, D. J. y Beristain, C. I. (2017). Effect of vacuum on the impregnation of *Lactobacillus rhamnosus* microcapsules in apple slices using double emulsion. *Journal of Food Engineering*, 202, 18-24. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.02.005
- García-Noguera, J., Oliveira, F. I. P., Weller, C. L., Rodrigues, S. y Fernandes, F. A. N. (2014). Effect of ultrasonic and osmotic dehydration pre-treatments on the colour of freeze dried strawberries. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2222-2227. doi: 10.1007/s13197-012-0724-x
- George, J. M., Senthamizh Selvan, T. y Rastogi, N. K. (2016). High-pressure-assisted infusion of bioactive compounds in apple slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 100-107. doi: 10.1016/j.ifset.2015.11.010
- Gómez-Ramírez, C., Sosa-Morales, M. E., Palou, E. y López-Malo, A. (2013). *Aspergillus niger* time to growth in dried tomatoes. *International Journal of Food Microbiology*, 164(1), 23-25. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2013.03.017
- González-Pérez, J. E., López-Méndez, E. M., Luna-Guevara, J. J., Ruiz-Espinosa, H., Ochoa-Velasco, C. E. y Ruiz-López, I. I. (2019). Analysis of mass transfer and morphometric characteristics of white mushroom (*Agaricus bisporus*) pilei during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 240, 120-132. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.07.026
- Kek, S. P., Chin, N. L. y Yusof, Y. A. (2013). Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 495-506. doi: 10.1016/j.fbp.2013.05.003
- Ketata, M., Desjardins, Y. y Ratti, C. (2013). Effect of liquid nitrogen pretreatments on osmotic dehydration of blueberries. *Journal of Food Engineering*, 116(1), 202-212. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.10.035
- Kiani, H., Karimi, F., Labbafi, M. y Fathi, M. (2018). A novel inverse numerical modeling method for the estimation of water and salt mass transfer coefficients during ultrasonic assisted-osmotic dehydration of cucumber cubes. *Ultrasonics Sonochemistry*, 44, 171-176. doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.02.003
- Kowalska, H., Marzec, A., Kowalska, J., Ciurzyńska, A., Samborska, K., Cichowska, J., Rybak, K. y Lenart, A. (2017). Osmotic dehydration of Honeoye strawberries in solutions enriched with natural bioactive molecules. *LWT - Food Science and Technology*, 85, 500-505. doi: 10.1016/j.lwt.2017.03.044
- Kuo, C.-H., Lin, J., Huang, C.-Y., Hsieh, S.-L., Li, S., Kuo, J.-M. y Shieh, C.-J. (2018). Predicting sugar content of candied watermelon rind during osmotic dehydration. *Food Science and Technology*, 38, 228-235. doi: 10.1590/fst.18817
- Kusnadi, C. y Sastry, S. K. (2012). Effect of moderate electric fields on salt diffusion into vegetable tissue. *Journal of Food Engineering*, 110(3), 329-336. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.01.004
- Lech, K., Figiel, A., Wojdyło, A., Korzeniowska, M., Serowik, M. y Szarycz, M. (2015). Drying kinetics and bioactivity of beetroot slices pretreated in concentrated chokeberry juice and dried with vacuum microwaves. *Drying Technology*, 33(13), 1644-1653. doi: 10.1080/07373937.2015.1075209
- Lech, K., Michalska, A., Wojdyło, A., Nowicka, P. y Figiel, A. (2017). The influence of the osmotic dehydration process on physicochemical properties of osmotic solution. *Molecules*, 22(12), 2246. doi: 10.3390/molecules22122246
- Lech, K., Michalska, A., Wojdyło, A., Nowicka, P. y Figiel, A. (2018). The influence of physical properties of selected plant materials on the process of osmotic dehydration. *LWT*, 91, 588-594. doi: 10.1016/j.lwt.2018.02.012
- Liu, B. y Peng, B. (2017). Modelling and optimization of process parameters for strawberry osmotic dehydration using central composite rotatable design. *Journal of Food Quality*, 2017(1), 1-7. doi: 10.1155/2017/2593213
- Luchese, C. L., Gurak, P. D. y Marczak, L. D. F. (2015). Osmotic dehydration of physalis (*Physalis peruviana* L.): evaluation of water loss and sucrose incorporation and the quantification of carotenoids. *LWT - Food Science and Technology*, 63(2), 1128-1136. doi: 10.1016/j.lwt.2015.04.060
- Luo, W., Tappi, S., Wang, C., Yu, Y., Zhu, S. y Rocculi, P. (2018). Study of the effect of High Hydrostatic Pressure (HHP) on the osmotic dehydration mechanism and kinetics of wumei fruit (*Prunus mume*). *Food and Bioprocess Technology*, 11(11), 2044-2054. doi: 10.1007/s11947-018-2165-7
- Martín-Belloso, O. y Morales-de la Peña, M. (2018). Fruit preservation by ohmic

- heating and pulsed electric fields. En A. Rosenthal *et al.* (Eds.), *Fruit Preservation* (pp. 441-456). Springer. doi: 10.1007/978-1-4939-3311-2\_16
- Mavroudis, N. E., Dejmek, P. y Sjöholm, I. (2004). Osmotic-treatment-induced cell death and osmotic processing kinetics of apples with characterised raw material properties. *Journal of Food Engineering*, 63(1), 47-56. doi: 10.1016/S0260-8774(03)00281-4
- Mavroudis, N. E., Gidley, M. J. y Sjöholm, I. (2012). Osmotic processing: effects of osmotic medium composition on the kinetics and texture of apple tissue. *Food Research International*, 48(2), 839-847. doi: 10.1016/j.foodres.2012.06.034
- Miano, A. C., Rojas, M. L. y Augusto, P. E. D. (2017). Other mass transfer unit operations enhanced by ultrasound. En D. Bermudez-Aguirre (Ed.), *Ultrasound: Advances for Food Processing and Preservation* (pp. 369-389). Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-12-804581-7.00015-4
- Mokhtarian, M., Heydari Majd, M., Koushki, F., Bakhshabadi, H., Daraei Garmakhany, A. y Rashidzadeh, S. (2014). Optimisation of pumpkin mass transfer kinetic during osmotic dehydration using artificial neural network and response surface methodology modelling. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 6(2), 201-214. doi: 10.3920/QAS2012.0121
- Monnerat, S. M., Pizzi, T. R. M., Mauro, M. A. y Menegalli, F. C. (2010). Osmotic dehydration of apples in sugar/salt solutions: concentration profiles and effective diffusion coefficients. *Journal of Food Engineering*, 100(4), 604-612. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.05.008
- Mújica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., López-Malo, A., Palou, E. y Welti-Chanes, J. (2003). Impregnation and osmotic dehydration of some fruits: effect of the vacuum pressure and syrup concentration. *Journal of Food Engineering*, 57(4), 305-314. doi: 10.1016/S0260-8774(02)00344-8
- Muñiz-Becerá, S., Méndez-Lagunas, L. L. y Rodríguez-Ramírez, J. (2017). Solute transfer in osmotic dehydration of vegetable foods: a review. *Journal of Food Science*, 82(10), 2251-2259. doi: 10.1111/1750-3841.13857
- Muszyński, S., Kornarzyński, K. y Gładyszewska, B. (2016). Osmotic dehydration of apples under reduced pressure conditions. *Agricultural Engineering*, 20(3), 135-143. doi: 10.1515/agriceng-2016-0051
- Nazari, A., Salehi, M. A. y Abbasi Souraki, B. (2019). Experimental investigation of effective factors of pulsed electric field in osmotic dehydration of apple. *Heat and Mass Transfer*, 55(7), 2049-2059. doi: 10.1007/s00231-019-02571-8
- Nowacka, M., Laghi, L., Rybak, K., Dalla Rosa, M., Witrowa-Rajchert, D. y Tylewicz, U. (2019). Water state and sugars in cranberry fruits subjected to combined treatments: Cutting, blanching and sonication. *Food Chemistry*, 299, 125122. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125122
- Nowacka, M., Tylewicz, U., Laghi, L., Dalla Rosa, M. y Witrowa-Rajchert, D. (2014). Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration. *Food Chemistry*, 144, 18-25. doi: 10.1016/j.foodchem.2013.05.129
- Nowacka, M., Tylewicz, U., Tappi, S., Siroli, L., Lanciotti, R., Witrowa-Rajchert, D. y Romani, S. (2018). Ultrasound assisted osmotic dehydration of organic cranberries (*Vaccinium oxycoccus*): study on quality parameters evolution during storage. *Food Control*, 93, 40-47. doi: 10.1016/j.foodcont.2018.05.005
- Nowacka, M., Wiktor, A., Anuszevska, A., Dadan, M., Rybak, K. y Witrowa-Rajchert, D. (2019). The application of unconventional technologies as pulsed electric field, ultrasound and microwave-vacuum drying in the production of dried cranberry snacks. *Ultrasonics Sonochemistry*, 56, 1-13. doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.03.023
- Nowicka, P., Wojdyło, A., Lech, K. y Figiel, A. (2015a). Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried sour cherry fruits pre-dehydrated in fruit concentrates. *Food and Bioprocess Technology*, 8(10), 2076-2095. doi: 10.1007/s11947-015-1561-5
- Nowicka, P., Wojdyło, A., Lech, K. y Figiel, A. (2015b). Influence of osmodehydration pretreatment and combined drying method on the bioactive potential of sour cherry fruits. *Food and Bioprocess Technology*, 8(4), 824-836. doi: 10.1007/s11947-014-1447-y
- Núñez-Mancilla, Y., Pérez-Won, M., Uribe, E., Vega-Gálvez, A. y Di Scala, K. (2013). Osmotic dehydration under high hydrostatic pressure: effects on antioxidant activity, total phenolics compounds, vitamin C and colour of strawberry (*Fragaria vesca*). *LWT - Food Science and Technology*, 52(2), 151-156. doi: 10.1016/j.lwt.2012.02.027
- Núñez-Mancilla, Y., Vega-Gálvez, A., Pérez-Won, M., Zura, L., García-Segovia, P. y Di Scala, K. (2014). Effect of osmotic dehydration under high hydrostatic pressure on microstructure, functional properties and bioactive compounds of strawberry (*Fragaria vesca*). *Food and Bioprocess Technology*, 7(2), 516-524. doi: 10.1007/s11947-013-1052-5
- Omolola, A. O., Jideani, A. I. O. y Kapila, P. F. (2017). Quality properties of fruits as affected by drying operation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(1), 95-108. doi: 10.1080/10408398.2013.859563
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R., Abdan, K., Chen, G. y Oladejo, A. O. (2017). Non-thermal hybrid drying of fruits and vegetables: a review of current

- technologies. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 43, 223-238. doi: 10.1016/j.ifset.2017.08.010
- Osae, R., Zhou, C., Xu, B., Tchabo, W., Tahir, H. E., Mustapha, A. T. y Ma, H. (2019). Effects of ultrasound, osmotic dehydration, and osmosonication pretreatments on bioactive compounds, chemical characterization, enzyme inactivation, color, and antioxidant activity of dried ginger slices. *Journal of Food Biochemistry*, 43(5), 1-14. doi: 10.1111/jfbc.12832
- Pacheco-Angulo, H., Herman-Lara, E., García-Alvarado, M. A. y Ruiz-López, I. I. (2016). Mass transfer modeling in osmotic dehydration: equilibrium characteristics and process dynamics under variable solution concentration and convective boundary. *Food and Bioproducts Processing*, 97, 88-99. doi: 10.1016/j.fbp.2015.11.002
- Parniakov, O., Bals, O., Lebovka, N. y Vorobiev, E. (2016). Effects of pulsed electric fields assisted osmotic dehydration on freezing-thawing and texture of apple tissue. *Journal of Food Engineering*, 183, 32-38. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2016.03.013
- Pei, F., Xiao, K., Chen, L., Yang, W., Zhao, L., Fang, Y., Ma, N., Mariga, A. M. y Hu, Q. (2019). Mass transfer characteristics during ultrasound-assisted osmotic dehydration of button mushroom (*Agaricus bisporus*). *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 2213-2223. doi: 10.1007/s13197-019-03707-8
- Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53(4), 1216-1217. doi: 10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x
- Qiu, L., Zhang, M., Tang, J., Adhikari, B. y Cao, P. (2019). Innovative technologies for producing and preserving intermediate moisture foods: a review. *Food Research International*, 116, 90-102. doi: 10.1016/j.foodres.2018.12.055
- Rahaman, A., Zeng, X.-A., Kumari, A., Rafiq, M., Siddeeq, A., Manzoor, M. F., Baloch, Z. y Ahmed, Z. (2019). Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on texture, bioactive compounds and metabolites analysis of plum. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104643. doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.104643
- Rahman, M. S. (2017). State diagram of foods and Its importance to food stability during storage and processing. En J. Ahmed (Ed.), *Glass Transition and Phase Transitions in Food and Biological Materials* (pp. 251-260). John Wiley & Sons. doi: 10.1002/9781118935682.ch11
- Rahman, S. M. A., Hoque, M. E., Rahman, S. y Hasanuzzaman, M. (2015). Osmotic dehydration of pumpkin using response surface methodology -influences of operating conditions on water loss and solute gain. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 5(5). doi: 10.4172/2155-9821.1000226
- Ramya, V. y Jain, N. K. (2017). A review on osmotic dehydration of fruits and vegetables: an integrated approach. *Journal of Food Process Engineering*, 40(3), 124-140. doi: 10.1111/jfpe.12440
- Rongtong, B., Suwonsichon, T., Ritthiruangdej, P. y Kasemsumran, S. (2018). Determination of water activity, total soluble solids and moisture, sucrose, glucose and fructose contents in osmotically dehydrated papaya using near-infrared spectroscopy. *Agriculture and Natural Resources*, 52(6), 557-564. doi: 10.1016/j.anres.2018.11.023
- Ruiz-López, I. I., Huerta-Mora, I. R., Vivar-Vera, M. A., Martínez-Sánchez, C. E. y Herman-Lara, E. (2010). Effect of osmotic dehydration on air-drying characteristics of chayote. *Drying Technology*, 28(10), 1201-1212. doi: 10.1080/07373937.2010.482716
- Sabarez, H. T. (2018). Thermal drying of foods. En A. Rosenthal et al. (Eds.), *Fruit Preservation* (pp. 181-210). Springer. doi: 10.1007/978-1-4939-3311-2\_7
- Şahin, U. y Öztürk, H. K. (2016). Effects of pulsed vacuum osmotic dehydration (PVOD) on drying kinetics of figs (*Ficus carica* L). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 36, 104-111. doi: 10.1016/j.ifset.2016.06.003
- Şahin, U. y Öztürk, H. K. (2018). Comparison between Artificial Neural Network model and mathematical models for drying kinetics of osmotically dehydrated and fresh figs under open sun drying. *Journal of Food Process Engineering*, 41(5), e12804. doi: 10.1111/jfpe.12804
- Salim, M. N. S., Gariépy, Y. y Raghavan, V. (2016). Effects of operating factors on osmotic dehydration of broccoli stalk slices. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1). doi: 10.1080/23311932.2015.1134025
- Samborska, K., Eliasson, L., Marzec, A., Kowalska, J., Piotrowski, D., Lenart, A. y Kowalska, H. (2019). The effect of adding berry fruit juice concentrates and by-product extract to sugar solution on osmotic dehydration and sensory properties of apples. *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 1927-1938. doi: 10.1007/s13197-019-03658-0
- Sangeeta y Hathan, B. S. (2016). Studies on mass transfer and diffusion coefficients in elephant foot yam (*Amorphophallus* spp.) during osmotic dehydration in sodium chloride solution: Studies on mass transfer and diffusion coefficients

- in elephant foot yam. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(3), 521-530. doi: 10.1111/jfpp.12631
- Sethi, K. y Kaur, M. (2019). Effect of osmotic dehydration on physicochemical properties of pineapple using honey, sucrose and honey-sucrose solutions. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1), 6257-6262. doi: 10.35940/ijeat.A2026.109119
- Shamaei, S., Emam-Djomeh, Z. y Moini, S. (2012). Ultrasound-assisted osmotic dehydration of cranberries: effect of finish drying methods and ultrasonic frequency on textural properties: ultrasound-osmotic dehydration of cranberry. *Journal of Texture Studies*, 43(2), 133-141. doi: 10.1111/j.1745-4603.2011.00323.x
- Shete, Y. V., Chavan, S. M., Champawat, P. S. y Jain, S. K. (2018). Reviews on osmotic dehydration of fruits and vegetables. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(2), 1964-1969.
- Simpson, R., Ramírez, C., Birchmeier, V., Almonacid, A., Moreno, J., Nuñez, H. y Jaques, A. (2015). Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples subjected to a moderate electric field. *Journal of Food Engineering*, 166, 204-211. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.05.027
- Sucheta, Chaturvedi, K. y Yadav, S. K. (2019). Ultrasonication assisted salt-spices impregnation in black carrots to attain anthocyanins stability, quality retention and antimicrobial efficacy on hot-air convective drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104661. doi: 10.1016/j.ulsonch.2019.104661
- Sulistiyawati, I., Dekker, M., Fogliano, V. y Verkerk, R. (2018). Osmotic dehydration of mango: effect of vacuum impregnation, high pressure, pectin methylesterase and ripeness on quality. *LWT*, 98, 179-186. doi: 10.1016/j.lwt.2018.08.032
- Tiroutchelvame, D., Sivakumar, V. y Maran, P. (2015). Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of amla (*Emblica officinalis* L.) cubes in sugar solution. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 21(4), 547-559. doi: 10.2298/CICEQ140712011T
- Traffano-Schiffo, M. V., Laghi, L., Castro-Giraldez, M., Tylewicz, U., Rocculi, P., Ragni, L., Dalla Rosa, M. y Fito, P. J. (2017). Osmotic dehydration of organic kiwifruit pre-treated by pulsed electric fields and monitored by NMR. *Food Chemistry*, 236, 87-93. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.02.046
- Traffano-Schiffo, M.V., Tylewicz, U., Castro-Giraldez, M., Fito, P. J., Ragni, L. y Dalla Rosa, M. (2016). Effect of pulsed electric fields pre-treatment on mass transport during the osmotic dehydration of organic kiwifruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 38, 243-251. doi: 10.1016/j.ifset.2016.10.011
- Tylewicz, U., Tappi, S., Mannozi, C., Romani, S., Dellarosa, N., Laghi, L., Ragni, L., Rocculi, P. y Dalla Rosa, M. (2017). Effect of pulsed electric field (PEF) pre-treatment coupled with osmotic dehydration on physico-chemical characteristics of organic strawberries. *Journal of Food Engineering*, 213, 2-9. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.04.028
- Verma, D., Kaushik, N. y Rao, P. S. (2014). Application of high hydrostatic pressure as a pretreatment for osmotic dehydration of banana slices (*Musa cavendishii*) finish-dried by dehumidified air drying. *Food and Bioprocess Technology*, 7(5), 1281-1297. doi: 10.1007/s11947-013-1124-6
- Wang, J., Law, C.L., Nema, P. K., Zhao, J.H., Liu, Z.L., Deng, L.Z. y Xiao, H.W. (2018). Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices. *Journal of Food Engineering*, 224, 129-138. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.01.002
- Witrowa-Rajchert, D., Wiktor, A., Sledz, M. y Nowacka, M. (2014). Selected emerging technologies to enhance the drying process: a review. *Drying Technology*, 32(11), 1386-1396. doi: 10.1080/07373937.2014.903412
- Wu, X., Wang, C. y Guo, Y. (2020). Effects of the high-pulsed electric field pretreatment on the mechanical properties of fruits and vegetables. *Journal of Food Engineering*, 274, 109837. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109837
- Yadav, A. K. y Singh, S. V. (2014). Osmotic dehydration of fruits and vegetables: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 1654-1673. doi: 10.1007/s13197-012-0659-2
- Yildiz, H., Icier, F., Eroglu, S. y Dagci, G. (2016). Effects of electrical pretreatment conditions on osmotic dehydration of apple slices: experimental investigation and simulation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 35, 149-159. doi: 10.1016/j.ifset.2016.05.001
- Yu, Y., Jin, T. Z., Fan, X. y Wu, J. (2018). Biochemical degradation and physical migration of polyphenolic compounds in osmotic dehydrated blueberries with pulsed electric field and thermal pretreatments. *Food Chemistry*, 239, 1219-1225. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.07.071
- Yu, Y., Jin, T. Z., Fan, X. y Xu, Y. (2017). Osmotic dehydration of blueberries pretreated with pulsed electric fields: effects on dehydration kinetics, and microbiological and nutritional qualities. *Drying Technology*, 35(13), 1543-1551. doi: 10.1080/07373937.2016.1260583