

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICO AGROPECUARIAS



**EFFECTO DEL ULTRASONIDO EN LA CINÉTICA DE
DESHIDRATACIÓN DE CUBOS DE FILETE TILAPIA (*Oreochromis
niloticus*) Y SU EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA, MICROBIOLÓGICA
Y DE REHIDRATACIÓN**

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA LA
OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICO
AGROPECUARIAS EN EL ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

PRESENTA
YESENIA ANAHÍ OLVERA RÍOS

XALISCO, NAYARIT; OCTUBRE DE 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NAYARIT
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICO AGROPECUARIAS

CBAP/175/19.

Xalisco, Nayarit; 04 de noviembre de 2019.

M.C. GLORIA MACHAIN IBARRA
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
NIVEL SUPERIOR Y POSGRADO
PRESENTE.

Con base al oficio de fecha 21 de octubre del presente, enviado por los CC. Dr. José Armando Ulloa, M.C. Petra Rosas Ulloa, Dr. José Carmen Ramírez Ramírez, M.C. Yessica Silva Carrillo, Dr. Ranferi Gutiérrez Leyva y Dr. Pedro Ulises Bautista Rosales, donde se indica que el trabajo de tesis cumple con lo establecido en forma y contenido, y debido a que ha finalizado con los demás requisitos que establece nuestra institución, se autoriza a la **Ing. Yesenia Anahí Olvera Ríos**, continúe con los trámites necesarios para la presentación del examen de grado de Maestría en Ciencias Biológico Agropecuarias en el Área de Ciencias Agrícolas.

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Por lo Nuestro y lo Universal"

Dr. Juan Diego García Paredes
Coordinador del Posgrado



C.c.p.- Expediente
M.mfm

Xalisco, Nayarit, 21 de octubre de 2019

Dr. Juan Diego García Paredes
Coordinador del Posgrado en Ciencias Biológico Agropecuarias
Universidad Autónoma de Nayarit
Presente:

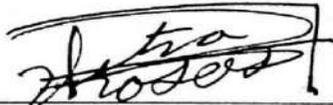
Los que suscribimos, integrantes del Comité Tutorial de la **Ing. Yesenia Anahí Olvera Ríos**, declaramos que hemos revisado la tesis titulada: **Efecto del ultrasonido en la cinética de deshidratación de cubos de filete tilapia (*Oreochromis niloticus*) y su evaluación fisicoquímica, microbiológica y de rehidratación** y aprobamos que puede ser presentada para aspirar al grado de Maestra en Ciencias Biológico Agropecuarias con opción terminal en Ciencias Agrícolas.

Atentamente

El comité tutorial



Dr. José Armando Ulloa
Director



M. en C. Petra Rosas Ulloa
Co-director



Dr. José Carmen Ramírez Ramírez
Asesor



M. en C. Yessica Silva Carrillo
Asesor



Dr. Ranferi Gutiérrez Leyva
Asesor



Dr. Pedro Ulises Bautista Rosales
Asesor

DEDICATORIAS

A mis padres

Daniel Olvera Padilla

Amelia Ríos Dueñas

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. José Armando Ulloa por su apoyo, confianza y enseñanzas durante la dirección de este proyecto de investigación.

A la M. en C. Petra Rosas Ulloa, mi Co- directora, por su amistad, la amena convivencia en el laboratorio en todo este tiempo y facilitar la realización de experimentos.

Al Dr. José Carmen Ramírez Ramírez, por su tutoría brindada y estar al pendiente, a pesar de no haber tomado clases con usted, gracias por todo su apoyo en los momentos necesarios aún en la distancia.

A la M. en C. Yessica Silva Carrillo por su tutoría brindada durante la realización del proyecto, por todas las sugerencias y observaciones semestre a semestre y por su accesibilidad y apoyo para facilitar el trámite de asistencia al Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería.

Al Dr. Ranferi Gutiérrez Leyva por su disposición, tutorías, observaciones y apoyo en la realización de este proyecto.

Al Dr. Pedro Ulises Bautista Rosales por sus sugerencias, sus clases y por sus observaciones en cada seminario.

A mis compañeros de laboratorio Gina, Naty, Juan, Thalía, Mine y Alexeyevich por su amistad, compañía y su apoyo incondicional en todas las etapas del proyecto.

El proyecto de investigación se realizó en el **Centro de Tecnología de Alimentos** perteneciente a la Secretaría de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma de Nayarit, bajo la dirección del Dr. José Armando Ulloa.

Durante los estudios de maestría, se otorgó el apoyo financiero a la autora de esta tesis (becario No. 739614), por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN	2
2. ANTECEDENTES	3
2.1 Generalidades de la tilapia	3
2.2 Morfología de la tilapia	4
2.3 Composición química del filete de pescado.....	5
2.4 Producción mundial de tilapia.....	6
2.5 Producción de tilapia en México	6
2.5.1 Comercialización de tilapia en México	7
2.6 Deshidratación de alimentos	7
2.6.1 Efectos de la deshidratación en la calidad del producto	8
2.6.2 Métodos de secado.....	9
2.6.3 Velocidad de deshidratación.....	10
2.7 Ultrasonido	12
2.7.1 Mecanismos de acción del ultrasonido	13
2.7.2 Aplicaciones del ultrasonido en el procesamiento de alimentos.....	13
2.7.3 Ultrasonido como pre-tratamiento en la deshidratación de alimentos	13
2.8 Parámetros cinéticos en deshidratación	15
2.9 Rehidratación de alimentos	15
2.9.1 Índices en rehidratación	16
2.9.2 Factores que influyen sobre el proceso de rehidratación	17
2.9.3 Parámetros cinéticos en rehidratación.....	19
2.9.4 Ecuación de Arrhenius.....	20
3. JUSTIFICACIÓN	21
4. HIPÓTESIS	21

5. OBJETIVOS	22
5.1 Objetivo general	22
5.2 Objetivos específicos.....	22
6. MATERIALES Y MÉTODOS	23
6.1 Materia prima	23
6.2 Pretratamiento con ultrasonido (US).....	23
6.3 Cinéticas de deshidratación	23
6.4 Caracterización fisicoquímica y microbiológica.....	25
6.5 Análisis de la microestructura.....	25
6.6 Rehidratación	25
6.7 Cálculo de la difusividad efectiva (D_{eff}) y energía de activación (E_a)	27
6.8 Análisis estadístico.....	27
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
7.1 Cinética de deshidratación	29
7.2 Características fisicoquímicas y cuenta microbiológica	31
7.3 Análisis de la microestructura.....	35
7.4 Características de rehidratación	36
7.5 Índices de rehidratación	41
7.6 Coeficiente de difusión (D_{eff}) y energía de activación (E_a).....	42
8. CONCLUSIONES	44
9. LITERATURA CITADA	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales constituyentes químicos (porcentaje en base húmeda) del músculo de pescado.....	5
Tabla 2. Estados productores de tilapia en México.....	6
Tabla 3. Actividad de agua mínima (a_w) para el crecimiento microbiano.....	8
Tabla 4. Métodos de deshidratación con mayor aplicación en alimentos.....	11
Tabla 5. Mecanismos de acción del ultrasonido.	14
Tabla 6. Modelos utilizados para ajustar los datos experimentales obtenidos durante la deshidratación de cubos de tilapia.	25
Tabla 7. Modelos utilizados para ajustar los datos obtenidos durante la rehidratación de los cubos de tilapia deshidratados.	26
Tabla 8. Diseño experimental para la cinética de deshidratación de cubos filete de tilapia.	28
Tabla 9. Parámetros cinéticos de los diferentes modelos matemáticos ajustados a los datos experimentales durante la deshidratación de cubos de filete de tilapia.	32
Tabla 10. Efecto de pretratamiento con ultrasonido en la composición química de los cubos de filete de tilapia deshidratados.....	33
Tabla 11. Valores de color y actividad de agua de los cubos de tilapia deshidratados	34
Tabla 12. Características microbiológicas de los cubos de filete de tilapia deshidratados.....	35
Tabla 13. Parámetros cinéticos y estadísticos de las cinéticas de absorción de agua de los cubos de filete de tilapia deshidratados de acuerdo al modelo de primer orden.....	39
Tabla 14. Parámetros cinéticos y estadísticos de las cinéticas de absorción de agua de los cubos de tilapia deshidratados de acuerdo al modelo de Weibull.....	39
Tabla 15. Parámetros cinéticos y estadísticos de las cinéticas de absorción de agua de los cubos de tilapia deshidratados de acuerdo al modelo exponencial.....	40
Tabla 16. Características de absorción de agua de los cubos de tilapia deshidratados siguiendo el modelo de Peleg.	40
Tabla 17. Valores de la capacidad de retención de materia seca (DHC), capacidad de absorción de agua (WAC) y capacidad de rehidratación (RA) de los cubos de tilapia deshidratados, rehidratados a 30, 40 y 50 ° C.	41
Tabla 18. Difusividad efectiva (D_{eff}) y energía de activación (E_a) para rehidratación de los cubos de tilapia deshidratados.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Morfología externa de la tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>)	4
Figura 2. Transferencia de masa interna y externa durante el secado	12
Figura 3. Efecto del pretratamiento con ultrasonido sobre la relación de humedad de los cubos filete de tilapia y el ajuste de los datos experimentales al modelo de Page. a) US y control 15 min y b) US y control 30 min. Los puntos representan los valores experimentales.	30
Figura 4. Micrografías de cubos de tilapia deshidratados obtenidas con microscopio electrónico de barrido, a) muestra control 15 min, b) muestra pretratada con US durante 15 min, c) muestra control 30 min y d) muestra pretratada con US durante 30 min.	36
Figura 5. Cinéticas de rehidratación de los cubos de filete de tilapia deshidratados y el ajuste de los datos experimentales al modelo de Peleg, realizada a: a) 30 °C, b) 40 °C y c) 50 °C. Los puntos representan los valores experimentales.....	37

RESUMEN

En México, la tilapia es un producto de bajo valor agregado que se comercializa comúnmente como entero o filete congelado a granel. Debido a su composición química el pescado es un alimento altamente perecedero. El contenido de agua en pescados varía del 80% en los magros al 60% en los grasos. Dado que el agua contenida en un alimento es responsable en gran medida de las reacciones químicas, enzimáticas y microbiológicas, es necesario el uso de tratamientos para su procesamiento y conservación. En este estudio se evaluó el efecto del ultrasonido como pretratamiento, en las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y de rehidratación de cubos de 0.7 cm de lado de filete de tilapia. Adicionalmente, se realizó microscopía electrónica de barrido (SEM) para analizar los cambios estructurales generados por el proceso de secado. También se utilizaron los datos experimentales para evaluar su ajuste a modelos matemáticos durante la deshidratación y rehidratación, determinando la bondad de ajuste mediante parámetros estadísticos. Los cubos de filete de tilapia, fueron pretratados con solución de cloruro de sodio (sal común) al 10% (p/v), en un baño de ultrasonido durante 15 y 30 min. La deshidratación de los segmentos de filete de tilapia se realizó a 35 °C con una velocidad de aire de 1.3 m/s. Los resultados mostraron que el ultrasonido por 15 min disminuyó el tiempo de secado de 1380 a 1,260 min, mientras que a 30 min de sonicación se redujo el tiempo de secado de 1,560 min a 1,260.

De acuerdo a las cinéticas de deshidratación, el modelo de Page fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales ($R^2 = 0.99$) y para rehidratación el modelo de Primer Orden presentó la mejor bondad de ajuste a los datos experimentales. Las microfotografías obtenidas de las muestras deshidratadas de cubos de filete de tilapia, pretratadas con US, presentaron un mayor daño celular en comparación con las muestras control, lo que permitió una mayor eliminación de la humedad circundante. Los resultados obtenidos pueden ser útiles en futuros estudios para el desarrollo de productos alimenticios y el diseño de procesos en la industria de la tilapia.

I. INTRODUCCIÓN

La tilapia es un pez de origen africano, que habita principalmente en regiones tropicales, donde existen las condiciones necesarias para su reproducción. Por las características de calidad de su carne (blanca, rica en nutrientes y la ausencia de espinas intramusculares), la tilapia tiene gran aceptación en los mercados tanto nacionales como extranjeros (Guan *et al.*, 2013). Sin embargo, los pescados tienden a deteriorarse químicamente y microbiológicamente durante el almacenamiento debido a su alta actividad de agua, lo que influye negativamente en el valor nutricional y las propiedades sensoriales del producto, así como en la formación de compuestos perjudiciales. Debido a lo anterior, es que se han desarrollado métodos de preservación para extender la vida útil de los productos (Ortiz *et al.*, 2013). El secado térmico es el método más antiguo e importante que se emplea para garantizar la estabilidad de un producto alimenticio, proporcionar estabilidad microbiológica y reducir peso y volumen, lo que lleva a una reducción en los costos de almacenamiento y transporte (Musielak *et al.*, 2016). Sin embargo, la exposición prolongada de alimentos al aire caliente puede provocar degradación parcial o total de los nutrientes y cambios en las características sensoriales esenciales del producto, como el color, el aspecto y las propiedades mecánicas (Corrêa *et al.*, 2017). Existe un especial interés en acortar el tiempo de secado y mejorar la eficiencia energética del proceso de secado y la calidad del producto final. Por otra parte, la tecnología de ultrasonido es una técnica innovadora usada en la industria alimentaria, ya que presenta ventaja sobre los procesos convencionales, al mejorar el secado y otros procesos de transferencia de masa, como la extracción (Zhang *et al.*, 2016) (Minjares-Fuentes *et al.*, 2016), la deshidratación osmótica (Nowacka *et al.*, 2014) y la desalación (Ozuna *et al.*, 2013). Dado lo anterior, es importante evaluar el efecto del ultrasonido como pretratamiento en las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y de rehidratación de cubos de filete de tilapia deshidratados por convección a baja temperatura.

2. ANTECEDENTES

2.1 Generalidades de la tilapia

Antiguamente la tilapia sólo se producía y comercializaba en África y algunas regiones de Asia, pero después alcanzó popularidad a nivel internacional (Vannuccini, 2003). En México este pez fue introducido en 1964 y actualmente su producción proviene principalmente de la acuicultura, es decir, se crían en granjas acuícolas (SAGARPA, 2016).

La tilapia es la segunda especie más cultivada en el ámbito internacional, ya que son de rápido crecimiento y reproducción en cautiverio (Pérez-Fuentes, *et al.*, 2016).

Varias especies de tilapia, entre las que destacan la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), la tilapia azul (*Oreochromis aureus*), la tilapia de Mozambique (*Oreochromis mossambicus*) y algunas líneas obtenidas por hibridación interespecífica, las cuales poseen cualidades que las convierten en organismos de gran interés para la acuicultura, entre las que destacan: crecimiento acelerado, tolerancia a altas densidades, resistencia a enfermedades, carne de amplia aceptación y buena calidad, así como también alta capacidad de hibridación que pudiera permitir el vigorizar caracteres deseables (Stickney, 1993, citado por Pérez *et al.*, 2004), las que le confieren una preferencia y demanda comercial en los mercados mundiales respecto a otras especies como salmones y peces marinos diversos.

La producción de cría de tilapia en México está destinada al repoblamiento de embalses (lagos, lagunas y presas) y al consumo (mercados locales y centrales de distribución). En este último aspecto, la tilapia ha resultado ser un importante componente para la economía de algunas regiones rurales de México (FIRCO, 2017).

Las tilapias se cultivan en los 32 estados de la República Mexicana, siendo los mayores productores Jalisco, Chiapas, Veracruz, Michoacán y Nayarit (CONAPESCA, 2013).

2.2 Morfología de la tilapia

Presenta un solo orificio nasal a cada lado de la cabeza, que sirve simultáneamente como entrada y salida de la cavidad nasal. El cuerpo es generalmente comprimido y discoidal, raramente alargado. La boca es protráctil, generalmente ancha, a menudo bordeada por labios gruesos; las mandíbulas presentan dientes cónicos y en algunas ocasiones incisivos.

Para su locomoción poseen aletas pares e impares. Las aletas pares las constituyen las pectorales y las ventrales; las impares están constituidas por las aletas dorsales, la caudal y la anal. La parte anterior de la aleta dorsal y anal es corta, consta de varias espinas y la parte terminal de radios suaves, disponiendo sus aletas dorsales en forma de cresta (Figura 1).

La aleta caudal es redonda, trunca y raramente cortada, como en todos los peces, esta aleta le sirve para mantener el equilibrio del cuerpo durante la natación y al lanzarse en el agua (Saavedra, 2006).



Figura 1. Morfología externa de la tilapia (*Oreochromis niloticus*).

2.3 Composición química del filete de pescado

De acuerdo con lo reportado por la FAO (2014), la composición química del filete de pescado varía considerablemente entre las diferentes especies y también entre individuos de la misma especie, dependiendo de la edad, sexo, medio ambiente y estación del año.

Los principales componentes químicos de la carne de pescado son agua, proteína y lípidos. Estos componentes son de máxima importancia en lo referente a su valor nutritivo, textura, características sensoriales y capacidad de almacenamiento (Gil, 2010). En la Tabla 1 se muestran los principales componentes químicos del músculo de pescado.

Tabla 1. Principales constituyentes químicos (porcentaje en base húmeda) del músculo de pescado.

Constituyentes	Proporción (%)
Agua	70-80
Proteína	15-22
Grasa	1-2
Carbohidratos	0-0.5
Sales minerales, fósforo, sodio, calcio y yodo	0.1-1
Vitaminas	A, B, D y E

Fuente: FAO (2014).

De acuerdo a la Tabla 1, la carne de pescado está compuesta por agua en un 70 a 80%. La proteína es el principal componente que sirve como nutriente para la alimentación humana y su contenido representa el 18% del peso total del músculo. La grasa se encuentra en una proporción entre el 1 y 2%, mientras que el contenido de carbohidratos es poco significativo, en donde el porcentaje de concentración no supera el 1% mientras que, por otra parte, los minerales de la carne de pescado representan unos 0.1 a 1 % de la misma.

2.4 Producción mundial de tilapia

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura (FAO), la tilapia (incluyendo todas las especies) constituye el segundo grupo más importante de peces cultivados (FAO, 2014).

El cultivo de la tilapia ha crecido de manera significativa en el mundo, y el desarrollo de tecnologías avanza a pasos agigantados. De acuerdo a datos de la FAO del año 2014, citados por Lucatero y Domínguez (2015), los grandes productores de tilapia son los países asiáticos, que representan el 80% de la producción mundial, con China al frente con el 42% de la oferta mundial (1.1 millones de toneladas), seguida de Tailandia, Indonesia, Filipinas y Taiwán siendo este último país el primer exportador del mundo. Debido a su rentabilidad, el cultivo de tilapia se extendió a la mayoría de los países cálidos, como República Sudafricana, Australia e Israel.

2.5 Producción de tilapia en México

De acuerdo a CONAPESCA (2017), la producción de tilapia en México fue de 156,146 toneladas en el 2016, primordialmente a través de técnicas de acuicultura con un volumen promedio de producción de 129,947 toneladas en los últimos 4 años. Como principales estados productores se encuentran Chiapas, Jalisco, Sinaloa, Nayarit y Michoacán (Tabla 2); los cuales producen el 72.2% del volumen nacional. Los estados que presentaron mayor incremento entre 2015 y 2016 fueron: Sonora (quien triplicó su producción), Quintana Roo, Tamaulipas, Querétaro, Durango, Sinaloa, Oaxaca y Yucatán. A nivel mundial, México ocupa el noveno lugar en la captura de tilapia.

Tabla 2. Estados productores de tilapia en México.

Estado	Producción en Toneladas
Chiapas	38,313
Jalisco	32,898
Sinaloa	16,573
Nayarit	12,649
Michoacán	12,285
Total	112,718

Fuente: CONAPESCA (2016)

2.5.1 Comercialización de tilapia en México

La gran influencia de los mercados acuícolas internacionales de la tilapia ha presionado al débil mercado interno que tiene México, marcando una fuerte competencia entre los productos importados que presentan valor agregado y los congelados de bajo costo, con la producción doméstica. Los mercados internacionales presentan una mayor variedad, mientras que los de origen nacional sólo se encuentran pescados frescos, enteros y en filete debido a que el eslabón de transformación de la tilapia tiene un incipiente desarrollo. Los mecanismos que permitirán hacer frente a este hecho, son la diferenciación y la conveniencia del producto (Norman-López y Bjorndal, 2009, citado por Lango-Reynoso *et al.*, 2015).

2.6 Deshidratación de alimentos

La disminución del agua presente en un alimento ha sido una estrategia utilizada desde la antigüedad para conservar la calidad durante los periodos de almacenamiento (Zapata-Montoya *et al.*, 2002). La deshidratación es definida en términos de disminución de la actividad de agua (a_w), dado que su reducción a ciertos niveles inhibe el crecimiento microbiano y las modificaciones enzimáticas (Guiné *et al.*, 2007). Para estos propósitos, los alimentos secos deben tener una actividad de agua inferior a 0.6. La actividad de agua es una medida de la disponibilidad del agua para las reacciones químicas y bioquímicas, por lo que representa un indicador de estabilidad alimenticia con respecto al crecimiento microbiano (Prosapio y Norton, 2017). De acuerdo a Arias-Tapia (2002), citado por Resendiz (2013), el agua pura, tiene una a_w de 1.00 y la mayoría de los alimentos se ven alterados por encima de 0.8 (Tabla 3).

Tabla 3. Actividad de agua mínima (a_w) para el crecimiento microbiano.

Grupo	a_w
Agua pura (Referencia)	1.00
Bacterias G-	0.97
Bacterias G+	0.90
Levaduras	0.88
Hongos filamentosos	0.80
Bacterias halófilas	0.75
Hongos xerofílicos	0.60

G(-)= Gram negativas; G(+)= Gram positivas. Fuente: Jangam *et al.* (2010).

La deshidratación o el secado implican calor transitorio y transferencia de masa acompañada de transformaciones físicas, químicas y de cambio de fase. Desafortunadamente, estas transformaciones pueden provocar cambios en la calidad del producto y en los mecanismos de transferencia de calor y masa.

En la actualidad, secar con aire caliente es el método más utilizado. Sin embargo, los largos tiempos de secado y el sobrecalentamiento de la superficie durante el proceso, provocan cambios de color, pérdida de sabor y disminución de la capacidad de rehidratación (Chen *et al.*, 2016).

2.6.1 Efectos de la deshidratación en la calidad del producto

En general, el agua que se elimina durante el procesamiento de alimentos no se puede reemplazar exactamente de la misma manera para producir un producto idéntico al material original. Es decir, siempre se presenta una degradación o cambio que da como resultado la pérdida de calidad en el producto rehidratado. El objetivo de la tecnología de deshidratación es minimizar estos posibles cambios en el producto, al tiempo que se optimiza la eficiencia del proceso y se minimizan los costos. Diferentes cambios pueden ocurrir durante la deshidratación, los cuales influyen en la calidad del producto rehidratado. En los productos deshidratados

existen, principalmente, dos problemas: a) la pérdida y el cambio de sabores, y b) el cambio en las cualidades físicas (Hartel y Heldman, 2012).

En consecuencia, los productos deshidratados contienen menos compuestos saborizantes volátiles que el material original. Además, las temperaturas elevadas durante el secado incrementan las velocidades de las reacciones químicas y muchas de éstas generan sabores indeseables en el producto final (Hartel y Heldman, 2012).

Además, durante el secado puede ocurrir la desnaturalización de proteínas y degradación de vitaminas, lo que puede influir en la calidad nutritiva de los productos secos. Sin embargo, la extensión de estos cambios durante el secado depende en gran medida de la naturaleza del proceso de secado (Hartel y Heldman, 2012).

2.6.2 Métodos de secado

Existe una gran diversidad de secadores, y muchos de ellos pueden funcionar igual de bien para cualquier producto alimenticio. La elección del secador se basa en factores como: a) características de los alimentos que se desean secar (líquido, sólido, en partículas, etc.), b) economía de un secador en particular y c) el costo del secador etc. Cada empresa y cada industria tienen sus propias preferencias para los tipos de secado que se han desarrollado a partir de años de experiencia. Sin embargo, todos operan bajo los mismos principios generales de transferencia de calor y masa. Los secadores se pueden clasificar de muchas maneras, pero una forma de comparar los secadores se basa en el tipo de medio de calentamiento que se utiliza para proporcionar energía para el secado. Estos, de acuerdo a Hartel y Heldman (2012), pueden ser ampliamente identificados como:

- a) Secadores de contacto directo, donde el aire caliente proporciona el efecto de secado.
- b) Secadores infrarrojos o dieléctricos, donde la energía de radiación suministra energía.
- c) Secadores de contacto indirecto, donde la transferencia de calor ocurre a través de un mecanismo secundario.

En cada categoría, los secadores pueden funcionar a presiones ambientales o bajo vacío para mejorar la vaporización a temperaturas reducidas. Una última categoría de tecnología de secado es el secado por congelación, en el que la humedad se elimina mediante una transición sólido-vapor (sublimación) mejorada por la baja presión (Harter y Heldman, 2012). En la Tabla 4 se muestran los métodos y equipos de deshidratación de alimentos más comunes.

2.6.3 Velocidad de deshidratación

Durante el proceso de secado, las moléculas de agua deben atravesar el producto alimenticio hacia la superficie (resistencia interna al secado), por efecto del contacto con el aire de secado (Figura 2). Una vez en la superficie, las moléculas de agua se transfieren al aire (resistencia externa al secado) en función de la diferencia en la presión de vapor entre el aire y la superficie. Cuando la presión de vapor en el aire alcanza el mismo valor que la presión de vapor de agua en la superficie del alimento, el proceso de secado cesa. La velocidad de secado puede estar limitada por la velocidad de migración interna de las moléculas de agua a la superficie, o la velocidad de evaporación de las moléculas de agua desde la superficie hacia el aire, dependiendo de las condiciones de secado. De hecho, la mayoría de los alimentos cambian de un proceso de secado externo durante las etapas iniciales a un proceso de secado interno, a medida que el producto se seca (Harter y Heldman, 2012).

Tabla 4. Métodos de deshidratación con mayor aplicación en alimentos.

Método	Equipo de deshidratación	Tipo de producto
En cama o banda	Deshidratador de bandejas. Deshidratador de banda. Deshidratador de túnel.	Sólidos (piezas, trozos), fluidos con sólidos de tamaño grande en suspensión y, en menor proporción, fluidos viscosos.
Por aire (convección)	Deshidratado por Aspersión.	Fluidos con pequeños sólidos en suspensión.
De partículas	Deshidratado por Espuma. Deshidratador de lecho Fluidizado.	Fluidos con pocos sólidos en suspensión. Sólidos de tamaño pequeño.
Por conducción	Deshidratador de tambor.	Fluidos muy viscosos (pastas).
Por radiación	Deshidratador por infrarrojo. Deshidratador dieléctrico. Deshidratador por microondas.	Cualquier tipo de alimento.
Por congelación	Liofilizador.	Sólidos de pequeño tamaño y suspensiones.

Fuente: Harter y Heldman (2012)

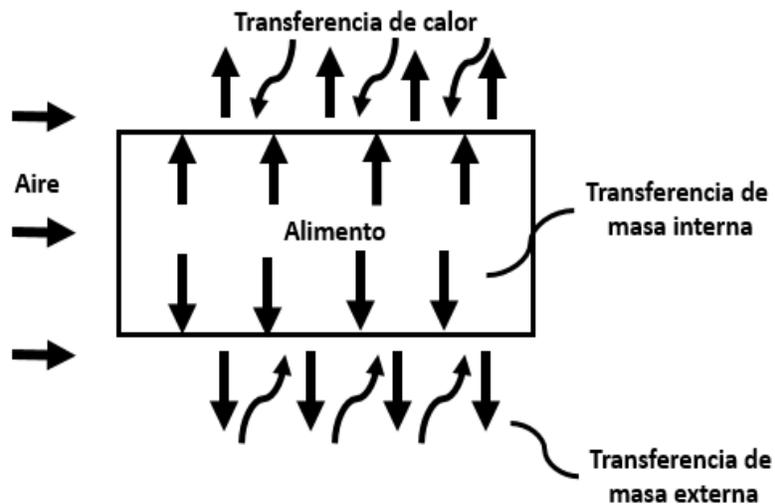


Figura 2. Transferencia de masa interna y externa durante el secado. Fuente: Harter y Heldman, 2012.

2.7 Ultrasonido

Se sabe que la energía de ultrasonido es útil para mejorar el proceso de transferencia de calor y masa. Esto se debe a varios efectos inducidos por las ondas ultrasónicas cuando viajan a través de un medio. Uno de esos efectos es la cavitación. Existen otros efectos tales como el “efecto de calentamiento” debido a la disipación de la energía mecánica y el “efecto esponja” debido a las compresiones y expansiones alternativas generadas por las ondas ultrasónicas (Yao, 2016).

Awad *et al.* (2012) definen al ultrasonido como ondas de sonido que tienen frecuencias superiores al límite de la audición humana. Robles-Ozuna y Ochoa-Martínez (2012), señalan que ha sido reconocido como una tecnología emergente que asiste o ayuda en la modificación de procesos o mejora los existentes.

El ultrasonido puede ser dividido, desde el punto de vista industrial, en dos grandes grupos: ultrasonido de alta intensidad (UAI) que es empleado para modificar procesos o productos y en ultrasonido de baja intensidad (UBI) que se aplica para diagnósticos (Gómez y López, 2009). La aplicación de ultrasonido o tecnología

ultrasonica es bastante atractiva en el procesamiento y la conservación de alimentos.

2.7.1 Mecanismos de acción del ultrasonido

De acuerdo a Delgado (2011) los mecanismos de acción del ultrasonido se clasifican principalmente en térmicos (generación de energía calórica o mecánica), y no térmicos (cavitación, rarefacción, formación de radicales libres, choques micro-mecánicos y fuerza de radiación), como se muestra en la Tabla 5.

2.7.2 Aplicaciones del ultrasonido en el procesamiento de alimentos

Recientemente se han desarrollado investigaciones sobre las aplicaciones del ultrasonido de alta y baja intensidad orientadas a los procesos de emulsificación (Hashtjin *et al.*, 2015), secado (Fernandes y Rodrigues, 2007), extracción (Kadam *et al.*, 2015), congelación (Cheng *et al.*, 2015), inactivación microbiana (Bermúdez-Aguirre y Barbosa-Canóvas, 2012), entre otros. Chemat *et al.*, (2011) señala que el ultrasonido puede ser aplicado en los alimentos en tres formas distintas: a) acoplado a un dispositivo, b) de aplicación directa y c) sumergido en un baño ultrasónico.

2.7.3 Ultrasonido como pre-tratamiento en la deshidratación de alimentos

El ultrasonido ya ha sido utilizado como pretratamiento al secado convectivo de diferentes productos alimenticios como algas pardas (Kadam *et al.*, 2015), melón (Fernandes *et al.*, 2008) y zanahorias (Ricce *et al.*, 2016), entre otros. Estos estudios han demostrado que el pretratamiento con ultrasonido es eficaz para mejorar y reducir el tiempo de proceso de secado. La base del ultrasonido como tratamiento previo al secado es su efecto mecánico y el fenómeno de cavitación ultrasónica. Específicamente, la propagación del ultrasonido en medio líquido puede causar una serie rápida de compresión y expansiones (efecto esponja), así como la formación de burbujas de cavitación (Tao *et al.*, 2016).

Tabla 5. Mecanismos de acción del ultrasonido.

Teoría	Mecanismo	Aplicación
Cavitación	Remoción mecánica por irrupción o atrapamiento de la bacteria, a través de burbujas localizadas con altas temperaturas (5,500 °C) y presiones (500 MPa).	Procesos de desinfección, lisis celular e inactivación enzimática.
Formación de radicales libres.	Sonólisis del agua que puede producir iones (OH-) y (H+) y peróxido de hidrógeno.	Inactivación microbiana y enzimática
Choques micro-mecánicos intracelulares.	Disrupción de las células y disminución del grosor de paredes celulares.	Lisis celular, inactivación enzimática y efecto antimicrobiano.
Generación de energía calórica y mecánica.	Propagación de la onda; decrece con la distancia al ser aplicado en material atenuante. Esta porción que es absorbida se traduce en calor.	Inactivación microbiana
Fuerza de radiación.	Movimiento o vibración local de un tejido por fuerza de radiación acústica.	Análisis clínicos
Compresión y rarefacción.	Microcorriente acústica.	Inactivación microbiana y enzimática.

Fuente: Delgado (2011).

Para llevar a cabo el pretratamiento, el producto se sumerge en un medio líquido (agua destilada o solución osmótica) con aplicación de ultrasonido. Después de eso, el producto se somete al secado convectivo. Este pretratamiento reduce la resistencia interna durante el proceso de secado debido a que el ultrasonido provoca cambios estructurales en los productos, como la formación de microcanales facilitando la transferencia de masa (Miano *et al.*, 2016).

2.8 Parámetros cinéticos en deshidratación

Actualmente existe una gran variedad de alimentos deshidratados para el consumo humano (sopas, frutas, aperitivos, entre otros) y la importancia de la calidad de éstos, así como las especificaciones y la conservación de energía, hacen énfasis en la necesidad de una comprensión completa del proceso de secado de los alimentos (Resendiz, 2013). Con el objetivo de diseñar, controlar y definir condiciones óptimas de secado, se requiere modelar el proceso real de secado en términos de relaciones o modelos matemáticos. Para analizar el proceso de secado de alimentos existen diferentes métodos propuestos como: modelos teóricos, semiteóricos y empíricos (Kavak y Bicer, 2005).

En el área de secado de productos marinos, los modelos basados en la teoría de difusión de líquidos más utilizados son: los modelos de Newton, Page, Henderson y Pabis, Page modificado, Thompson, Wang y Singh, exponencial de dos parámetros y logarítmico (Henderson y Pabis, 1961; Thompson *et al.*, 1968; Henderson, 1974; Wang y Singh 1978; White *et al.*, 1981; Bruce, 1985, Madamba *et al.*, 1996; Togrul y Pehlivan (Citados por Başlar *et al.*, 2014 y Başlar *et al.*, 2015).

Cabe mencionar que una gran cantidad de modelos teóricos y empíricos, han sido aplicados para diversos procesos de alimentos deshidratados, productos cárnicos y marinos como, sardinas (Djendoubi *et al.*, 2008), filetes de salmón y trucha (Başlar *et al.*, 2015), algas pardas (Kadam *et al.*, 2015), carne y pollo (Başlar *et al.*, 2014), tilapia (Guan *et al.*, 2013).

2.9 Rehidratación de alimentos

Algunos alimentos deshidratados deben ser rehidratados para su consumo o uso posterior. La rehidratación es un proceso complejo que pretende recuperar las propiedades del material fresco cuando el material seco se sumerge en el líquido rehidratante. La rehidratación no puede considerarse simplemente como un proceso inverso de deshidratación. La rehidratación indica la extensión del daño en la

estructura del material deshidratado ocasionado durante el secado y el pretratamiento inicial (Zielinska y Markowsky, 2016).

Dentro de los medios de rehidratación más utilizados en alimentos se encuentran, la inmersión en agua como la más simple, en soluciones azucaradas (glucosa, sacarosa), leche, yogur, jugos de frutas y verduras, entre otras, donde los períodos de inmersión, deben ser breves, y estos medios de rehidratación ayuden a conseguir un producto de características similares al producto fresco (Marín *et al.*, 2006).

Durante el proceso de rehidratación existen tres procesos simultáneos: a) la absorción de agua dentro del material deshidratado, b) la lixiviación de solutos y c) el hinchamiento del material (Cerón *et al.*, 2015), donde el cambio de volumen del producto deshidratado es proporcional a la cantidad de agua absorbida, aumentado o recuperando su tamaño y volumen inicial.

Se han realizado numerosos estudios sobre la rehidratación de alimentos como manzanas (Bilbao-Sáinz *et al.*, 2005), setas (García-Pascual *et al.*, 2005), pastas (Cunningham *et al.*, 2007), tomates (Santos-Sánchez *et al.*, 2012), y carne de cerdo (Muñoz *et al.*, 2012), por inmersión en agua.

2.9.1 Índices en rehidratación

Las variables operacionales del secado (temperatura, velocidad de aire, humedad relativa y tiempo) afectan significativamente la calidad final del producto rehidratado, por lo que es común utilizar índices numéricos para observar este efecto. Entre estos indicadores destacan la capacidad de absorción de agua (WAC), capacidad de retención de materia seca (DHC) y la capacidad de rehidratación (RA) que se describen a continuación (Vázquez *et al.*, 2007):

a) Capacidad de absorción de agua (WAC): Aporta información sobre la capacidad del material para absorber agua. Cuanto más se pierda la capacidad de absorción de agua durante la deshidratación, más pequeño será el índice y se calcula de la siguiente ecuación:

$$WAC = \frac{m_r(100-S_r)-m_d(100-S_d)}{m_0(100-S_0)-m_d(100-S_d)} \quad [1]$$

Donde m= masa (g), S= contenido de materia seca (%) y los subíndices d, 0 y r se refieren al producto una vez ya seco, antes del proceso de secado y una vez ya rehidratado respectivamente.

b) Capacidad de retención de materia seca (DHC): Es el parámetro que indica en qué medida se encuentra dañado el tejido y la permeabilidad a sustancias solubles. Cuanto más daño presente más pequeño será el índice. Se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$DHC = \frac{m_r S_r}{m_d S_d} \quad [2]$$

c) Capacidad de rehidratación (RA): Parámetro que representa la capacidad del producto a ser rehidratado, de tal forma que cuanto más dañado esté el tejido, más pequeño será el índice. Se obtiene mediante el producto de los dos índices anteriormente citados, con la siguiente ecuación:

$$RA = (WAC)(DHC) \quad [3]$$

2.9.2 Factores que influyen sobre el proceso de rehidratación

Dentro de los factores que influyen en los mecanismos de transferencia de materia ocurridos durante el fenómeno de rehidratación de alimentos, se encuentran los extrínsecos e intrínsecos, de acuerdo a Marín *et al.*, (2006) y son los siguientes.

2.9.2.1 Factores extrínsecos

- a) **Pretratamiento al secado:** todo pretratamiento de secado tiene cierta influencia sobre el producto deshidratado en el proceso posterior de rehidratación. Estos pretratamientos se pueden citar de acuerdo a tratamientos químicos con compuestos inorgánicos (dióxido de azufre, cloruro de calcio, metabisulfito de potasio, cloruro de sodio, bicarbonato de

sodio), orgánicos (sacarosa, glicerol, dextranos, almidón) o no químicos (osmosis, escaldado, congelado, altas presiones).

- b) **Método de secado:** los diferentes tipos o sistemas de secado son la principal causa que pudiese afectar la rehidratación del producto deshidratado, por lo que se debe considerar el tipo de secado que menor daño provoque a la estructura del producto, y sobre sus propiedades sensoriales y nutricionales.
- c) **Temperatura y velocidad de secado:** las altas temperaturas de secado implican un menor tiempo de rehidratación, pero los índices de calidad del producto final presentan cambios muy variables con respecto al producto fresco; el aumento de la velocidad de secado provoca un menor tiempo de secado, pero también presenta la misma tendencia que la temperatura de secado, con un mayor daño celular.
- d) **Temperatura de almacenamiento:** durante el almacenamiento se va perdiendo calidad de los productos deshidratados (color, aroma, textura), además aparecen reacciones de pardeamiento no-enzimático y a medida que se incrementa la temperatura de almacenaje, estos daños se vuelven más severos, debido a que, a mayor temperatura, mayores son los cambios composicionales y estructurales de los polisacáridos de la pared celular y menor la capacidad de absorción de agua.

2.9.2.2 Factores intrínsecos

- a) **Líquido de rehidratación:** en algunos procesos se utilizan medios de rehidratación tales como leche, yogur, disoluciones azucaradas o salinas, con la finalidad de mejorar las características finales del producto rehidratado. La velocidad de rehidratación es mayor en un medio como el agua, en cambio es menor por ejemplo en soluciones azucaradas, debido a la elevada viscosidad que presentan éstas, sin embargo, estas últimas pueden transportar sólidos de importancia nutritiva al producto como vitaminas, proteínas, minerales, entre otros.

- b) **Temperatura de la solución de rehidratación:** un alimento deshidratado a una temperatura constante, y luego rehidratado a diferentes temperaturas en un medio rehidratante, aumenta su contenido de humedad de equilibrio cuanto mayor sea la temperatura de rehidratación, debido al gradiente de calor entre el interior del alimento y el líquido de inmersión, además la alta presión que se ejerce sobre los gases que pudieran estar atrapados entre los espacios intercelulares, permite que se muevan por difusión o capilaridad, provocando así una reducción sustancial del tiempo de secado.
- c) **Agitación durante la rehidratación:** la generación de turbulencia en el medio de rehidratación logra una mayor homogenización, aumentando la entropía del sistema y la facilidad del intercambio de materia (agua y solutos), siempre y cuando se tenga en cuenta la velocidad de agitación.
- d) **Características del producto:** es importante conocer las características del alimento en su estado fresco y deshidratado, debido a que las propiedades físico-químicas, mecánicas (microestructurales), sensoriales y nutricionales, cambian considerablemente de un producto fresco a deshidratado, de tal manera que estos factores determinan el comportamiento de los alimentos en el proceso de rehidratación.

2.9.3 Parámetros cinéticos en rehidratación

Diferentes trabajos (Muñoz *et al.*, 2012; Ricce *et al.*, 2016; Seremet *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2016) han sido enfocados al estudio de la difusión del agua dentro de los alimentos, debido a que este proceso está influenciado por factores intrínsecos y extrínsecos (Resendiz, 2013). Dentro de los modelos más utilizados se incluyen: el modelo difusional el cual se fundamenta la segunda ley de Fick, el modelo de Peleg (Peleg, 1988), primer orden (Krokida y Marinos-Kouris, 2003), Weibull (Marabi y Saguy, 2004) y modelo exponencial (Misra y Brooker, 1980). De los modelos mencionados anteriormente, el modelo de Peleg es el que destaca como el más utilizado en el proceso de rehidratación de diferentes tipos de alimentos (Cunningham *et al.*, 2007 (pasta), Maldonado *et al.*, 2010 (mangos), Deng *et al.*,

2014 (filetes de calamar), Ricce *et al.*, 2016 (Zanahoria)). Cabe mencionar que actualmente la información sobre las características del modelado y la rehidratación de cubos de tilapia deshidratados a baja temperatura no se ha reportado.

2.9.4 Ecuación de Arrhenius

Arrhenius observó que en la mayoría de las reacciones el aumento de la velocidad con respecto al aumento de la temperatura no es lineal. Así también descubrió que la mayoría de los datos de velocidades de reacción cumplían una ecuación basada en tres factores: a) la fracción de las moléculas que tienen una energía igual a la de activación, (E_a), o mayor; b) el número de colisiones que ocurren por segundo, y c) la fracción de colisiones que tienen la orientación adecuada. Estos factores se incorporaron en la ecuación de Arrhenius:

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad [4]$$

Donde k es la constante de velocidad, E_a es la energía de activación, R es la constante de los gases (8.314 J/mol-k) y T es la temperatura absoluta.

Conforme aumenta la magnitud de E_a , k disminuye, debido a que la fracción de las moléculas que tienen la energía necesaria es más pequeña. Así, la velocidad de reacción disminuye conforme la E_a aumenta (Brown *et al.*, 2009).

3. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, existen alimentos deshidratados que pueden servir como base para el desarrollo de diferentes productos como fuentes importantes de fibra dietética, proteínas, antioxidantes, vitaminas y minerales. Al convertir un alimento fresco en un producto deshidratado, además de reducir los costos para su transporte, distribución y almacenaje, se le da valor agregado. Por otra parte, de acuerdo a la literatura, la aplicación de ultrasonido en el procesamiento de alimentos mejora los procesos de transferencia de masa. Además, su utilización como pretratamiento en procesos de deshidratación y rehidratación de diferentes alimentos reduce los tiempos de proceso. Sin embargo, los estudios referidos a la aplicación de ultrasonido como pretratamiento para la deshidratación a baja temperatura de cubos de tilapia no se han reportado. Por lo tanto, en el presente estudio se propone la aplicación del ultrasonido como un pretratamiento al deshidratado de cubos de filete de tilapia para mejorar sus propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y de rehidratación.

4. HIPÓTESIS

El pretratamiento con ultrasonido reducirá los tiempos de deshidratación y mejorará las características microbiológicas y de rehidratación de segmentos de filete de tilapia deshidratados.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del ultrasonido en las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y de rehidratación de segmentos de filete de tilapia deshidratados por convección a baja temperatura.

5.2 Objetivos específicos

- a) Determinar el efecto del ultrasonido sobre las características fisicoquímicas de cubos de tilapia deshidratados
- b) Evaluar el efecto del ultrasonido sobre la calidad microbiológica de los cubos de tilapia deshidratados.
- c) Describir el efecto del ultrasonido sobre las cinéticas de deshidratación y rehidratación de cubos de filete de tilapia.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Materia prima

Los filetes de tilapia fueron adquiridos en el Mercado de Mariscos de la Ciudad de Tepic, Nayarit. Éstos se transportaron al Edificio de Tecnología de Alimentos de la Universidad Autónoma de Nayarit, en bolsas de polietileno dentro de una hielera y fueron almacenados a temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta su posterior uso.

6.2 Pretratamiento con ultrasonido (US)

Se colocaron 200 ± 1 g de cubos de 0.7 cm de lado de filete de tilapia, en vasos de precipitados de 1000 mL con 800 mL de solución salina al 10 % p/v, a temperatura ambiente. Enseguida, los vasos se introdujeron en un baño de ultrasonido Branson modelo MTH-3510 a 40 kHz (potencia de 130 W; capacidad del depósito de 5 L; dimensiones internas de $290 \times 150 \times 150$ mm; densidad de energía acústica de 0.026 W / cm^3) para recibir el tratamiento en intervalos de 15 y 30 min.

6.3 Cinéticas de deshidratación

Los cubos de filete de tilapia tratados con ultrasonido, así como los tratamientos control, se deshidrataron en un horno de gabinete Venticell 111-Standard (Germany) a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, humedad relativa de $45 \pm 5\%$ y velocidad del aire de 1.3 m/s, el flujo horizontalmente a través del material experimental. La velocidad del aire se midió utilizando un termo anemómetro CEM DT- 618 (Shenzhen Everbest Machinery Industry, Co. Ltd, Nanshan, Shenzhen, China).

Los cubos de filete de tilapia se colocaron dentro del horno, en una sola capa sobre una bandeja rectangular (0.52×0.32 m) de malla de plástico con marco de aluminio. Las muestras fueron retiradas del secador en intervalos de 60 min durante el proceso de deshidratación y sus pesos se registraron utilizando una balanza digital H 2710 con 0.01 g de exactitud (Ohaus Corporation, Parsippany, NJ, USA). Cada tratamiento se realizó por triplicado. El proceso de deshidratación fue detenido una vez que la muestra se mantuvo a peso constante en dos mediciones sucesivas.

El cálculo de la relación de humedad (MR) fue determinado mediante la siguiente ecuación:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad [5]$$

Donde M_t es el contenido de humedad al tiempo t, M_e es el contenido de humedad en el equilibrio y M_0 es el contenido de humedad inicial.

Los datos experimentales de deshidratación obtenidos, se ajustaron cuatro modelos: Page (Jain y Pathare, 2007), Wang y Singh (Kadam *et al*, 2015), Lewis (Guan *et al.*, 2013) y Page Modificado (Vega-Gálvez *et al.*, 2011), mediante un análisis de regresión no lineal utilizando el software Stistica (StatSoft Inc, versión 10). Las expresiones matemáticas de los modelos se muestran en la Tabla 6. Para determinar el mejor ajuste de los modelos matemáticos con los datos experimentales, se utilizaron los siguientes parámetros estadísticos: coeficiente de determinación R^2 , chi-cuadrado χ^2 (ecuación 6) y raíz del cuadrado medio del error RMSE (ecuación 7).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2 / N-z \quad [6]$$

$$RMSE = \left[1/N \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2 \right]^{1/2} \quad [7]$$

Donde $MR_{exp,i}$ y $MR_{pred,i}$ son los valores de la relación de humedad experimental y predicha por el modelo, N es el número de observaciones y z es el número de constantes en el modelo.

Tabla 6. Modelos utilizados para ajustar los datos experimentales obtenidos durante la deshidratación de cubos de tilapia.

Modelo	Expresión matemática	No. de ecuación
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[8]
Wang & Singh	$MR = 1 + at + bt$	[9]
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	[10]
Page modificado	$MR = \exp(-kt)^n$	[11]

6.4 Caracterización fisicoquímica y microbiológica

Para la caracterización fisicoquímica de los productos se determinó actividad de agua (a_w), color (L^* , a^* , b^* , H^* y C^*) y análisis proximal (contenido de cenizas, humedad, grasa y proteína bruta), de acuerdo a los métodos oficiales de la AOAC (1995), mientras que para la caracterización microbiológica se determinaron los recuentos de bacterias mesófilas aeróbicas (NOM-092-SSA1-1994), coliformes totales y fecales (NOM-113-SSA1-1994), mohos y levaduras (NOM-111-SSA1-1994), por triplicado.

6.5 Análisis de la microestructura

Los cubos de filete de tilapia deshidratados se observaron en un microscopio electrónico de barrido (SEM), (SEC, Mini-SEM SNE-3200M, Corea del Sur) a un voltaje de aceleración de 20 kV. Previamente a la captación de las imágenes, las muestras se recubrieron con una película de oro usando un revestidor de pulverización iónica (MCM-100, SEC).

6.6 Rehidratación

Se colocaron muestras de 4 ± 0.1 g de cubos de tilapia deshidratados en un vaso de vidrio con 1 L de agua destilada, previamente calentada a la temperatura de remojo de 30, 40 y 50 °C, y posteriormente el vaso se colocó dentro de un baño de agua con control termostático para mantener la temperatura de remojo requerida (± 1 °C). La absorción de agua se determinó usando una balanza digital H2710 (Ohaus

Corporation, Parsippany, NJ, USA). Las muestras se retiraron a intervalos de 10 min eliminando el exceso de agua de la superficie con papel absorbente y se pesaron. Cada ensayo se realizó por triplicado. La relación de rehidratación (RR) se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación (12):

$$RR = \frac{W_r - W_d}{W_d} \quad [12]$$

Donde W_r es el peso de la muestra después de la rehidratación (g) y W_d es el peso del material seco.

Para evaluar las características de rehidratación de los cubos de filete de tilapia se utilizaron los índices: capacidad de rehidratación (RA), capacidad de absorción de agua (WAC) y capacidad de retención de materia seca (DHC). Las ecuaciones 1, 2 y 3 reportadas por Vázquez *et al.*, (2007), expresan como calcular los índices mencionados.

Los modelos semiempíricos de Peleg (Cox *et al.*, 2012), primer orden (Muñoz, *et al.*, 2012), Weibull (Cox *et al.*, 2012) y modelo exponencial (Oliveira *et al.*, 2013) se utilizaron para ajustar los datos experimentales obtenidos durante el proceso de rehidratación de los cubos de filete de tilapia, en función de la temperatura de remojo (Tabla 7).

Tabla 7. Modelos utilizados para ajustar los datos obtenidos durante la rehidratación de los cubos de tilapia deshidratados.

Modelo	Expresión matemática	Número de ecuación
Peleg	$RR = W_0 + t / k_1 + k_2 t$	[13]
Primer orden	$RR = W_e + (W_0 - W_e) \exp(-kt)$	[14]
Weibull	$RR = \exp(-t / \beta)^\alpha$	[15]
Modelo exponencial	$RR = W_e + [1 + \exp(-kt)]$	[16]

6.7 Cálculo de la difusividad efectiva (D_{eff}) y energía de activación (E_a)

De acuerdo con Schössler *et al.* (2012) la solución para la geometría de un cubo ha sido presentada por Crank (1985) (Ec. 17), asumiendo un contenido de humedad inicial uniforme, difusividad efectiva constante a lo largo del sólido, resistencias externas y encogimiento despreciables.

$$\frac{x-x_e}{X_0-x_e} = \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)\pi^2} \exp\left(-D_{eff} \frac{(2n+1)^2 \pi^2 t}{4a^2}\right) \right)^3 \quad [17]$$

Donde X_e es el contenido de humedad de equilibrio, X_0 es el contenido de humedad inicial y la longitud del material.

Restringiendo de la ecuación [17] al primer término resulta:

$$\frac{x-x_e}{X_0-x_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{D_{eff} \pi^2 t}{4L^2}\right) \quad [18]$$

El valor de D_{eff} se calculó aplicando el método de las pendientes. Este método se ha usado con éxito para la determinación de difusividades efectivas de diferentes alimentos como mangos (Maldonado *et al.*, 2010), sardina (Darvishi, 2013) o banano (Karim y Hawlader, 2005). La dependencia de la temperatura de D_{eff} se calculó utilizando la ecuación de Arrhenius expresada en la expresión matemática [19]:

$$D_{eff} = D_0 \exp - \frac{E_a}{RT} \quad [19]$$

Donde D_0 es el factor pre-exponencial para la ecuación de Arrhenius, E_a es la energía de activación, R es la constante de los gases y T la temperatura.

6.8 Análisis estadístico

Para realizar el análisis estadístico de los datos experimentales obtenidos durante el proceso de deshidratación y rehidratación se utilizó un diseño completamente al azar (Tabla 8) con tres repeticiones por tratamiento y 200 ± 1 g de cubos de filete de tilapia como unidad experimental.

Los datos experimentales obtenidos durante el proceso de deshidratación y rehidratación fueron sometidos a un análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia $P < 0.05$ con ayuda del software Statgraphics Centurion XVI (Statistical Graphics Corp., USA).

Tabla 8. Diseño experimental para la cinética de deshidratación de cubos filete de tilapia.

Tiempo exposición al ultrasonido (min)	Tratamiento
0	C15
15	US30
0	C30
30	US30

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Cinética de deshidratación

Los valores de la tasa de humedad (MR) de los cubos de filete de tilapia se presentan como una función del tiempo en la figura 3. Los valores de MR disminuyeron exponencialmente con el tiempo; dicha tendencia coincide con lo reportado en otras investigaciones en donde se secaron filetes de salmón (Başlar *et al.*, 2015), manzanas (Mierzwa y Kowalski, 2016), zanahorias negras (Haq *et al.*, 2016), quimbombós (Tüfekçi y Gökhan, 2017) y piraracús (*Arapaima gigas*) (Galvão y da Silva, 2017).

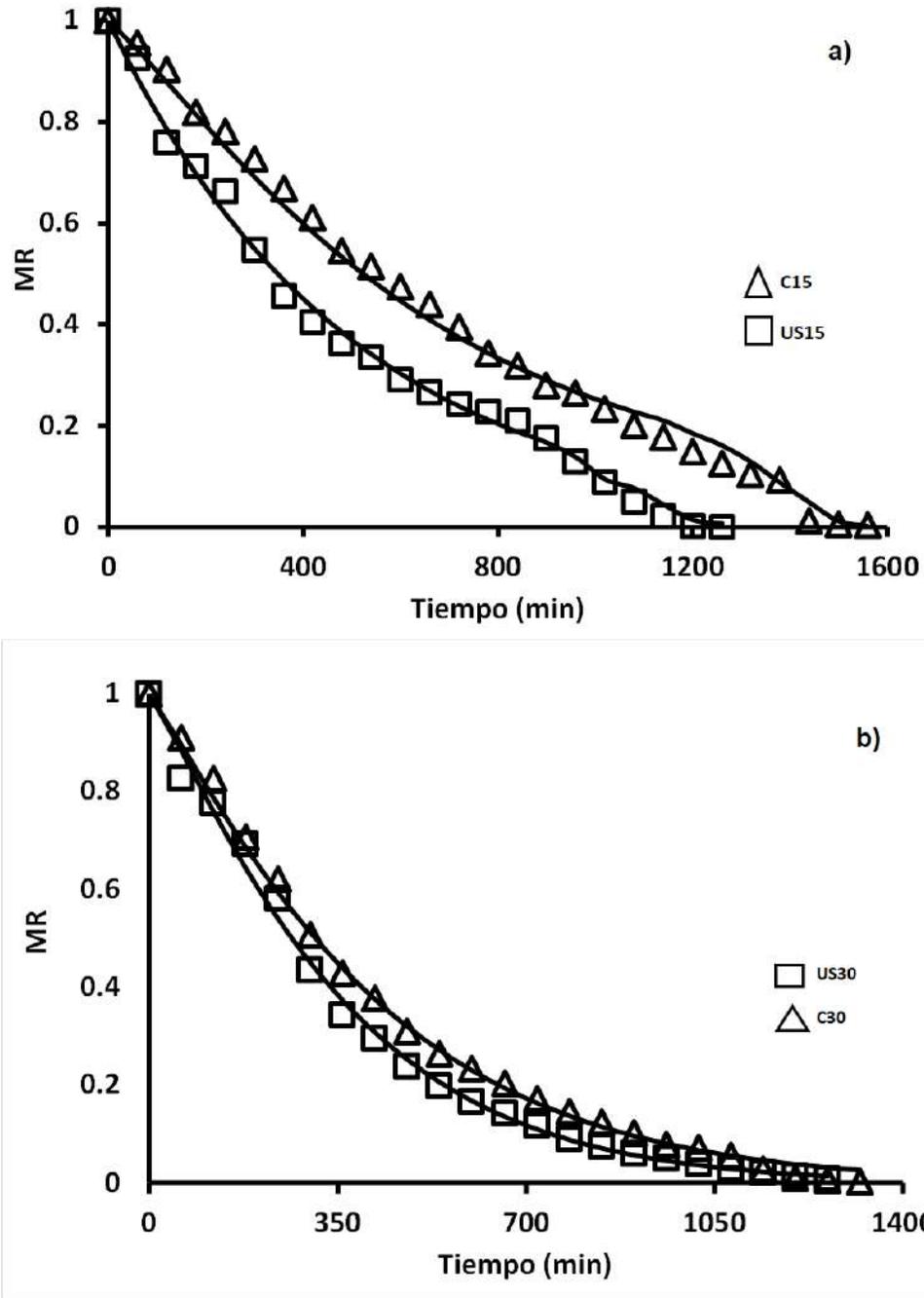


Figura 3. Efecto del pretratamiento con ultrasonido sobre la relación de humedad de los cubos filete de tilapia y el ajuste de los datos experimentales al modelo de Page. a) US y control 15 min y b) US y control 30 min. Los puntos representan los valores experimentales.

El movimiento de la humedad se debe al mecanismo físico de difusión. En la etapa inicial del proceso de secado, el movimiento de la humedad es rápido debido a la evaporación del agua en la superficie del producto (Başlar *et al.*, 2014). Los

objetivos básicos de la tecnología de ultrasonido son causar cambios estructurales como la disrupción celular y la formación de microcanales para aumentar la transferencia de masa (Deng *et al.*, 2014). En el presente estudio, los resultados indican que el uso de ultrasonido como pretratamiento mejora la transferencia de masa, reduciendo el tiempo de secado de los cubos de filete de tilapia. Al aplicar 15 min de US (Figura 3a) el tiempo de deshidratación se redujo de 1,560 a 1,260 min, mientras que para la sonicación durante 30 min (Fig. 3b) el tiempo de deshidratación disminuyó de 1,380 a 1,260 min. Los datos de deshidratación obtenidos de los experimentos se ajustaron a los modelos matemáticos mencionados en la tabla 8. Los parámetros cinéticos se resumen en la tabla 9.

7.2 Características fisicoquímicas y cuenta microbiológica

El contenido de humedad, proteína cruda (N x 6.25), extracto etéreo y cenizas en los cubos de filete de tilapia fresca y deshidratada se muestran en la Tabla 10. Se presentaron ligeras diferencias para los valores de humedad entre tratamientos, siendo para las muestras de US30 los valores más bajos (8.87 g/100 g), seguido de la muestra US15 (10.95 g/100 g) y posteriormente las muestras C30 (12.18 g/100 g) y C15 (13.02 g/100 g). Después de la deshidratación, el contenido de proteína aumentó significativamente ($P < 0.05$) en comparación con los cubos de filete de tilapia fresca, por el efecto de concentración de solutos después de la eliminación de agua (Chukwu, 2009).

Tabla 9. Parámetros cinéticos de los diferentes modelos matemáticos ajustados a los datos experimentales durante la deshidratación de cubos de filete de tilapia.

Modelo	Parámetro	Tratamientos			
		C15	C30	US15	US30
Page	K	0.3305 ± 0.06	0.3361 ± 0.04	0.3421 ± 0.03	0.3337 ± 0.08
	N	0.9314 ± 0.07	0.8849 ± 0.04	0.8928 ± 0.02	1.1708 ± 0.08
	R ²	0.9946	0.9889	0.9977	0.9944
	χ ²	0.0011	0.0020	0.0005	0.0009
	RMSE	0.1215	0.1660	0.0700	0.1280
Wang y Singh	A	-0.1741 ± 0.01	-0.2029 ± 0.02	-0.3756 ± 0.05	-0.2858 ± 0.04
	B	0.0029 ± 0.03	0.0034 ± 0.07	0.0064 ± 0.01	0.0043 ± 0.01
	R ²	0.9885	0.9902	0.9906	0.9676
	χ ²	0.0025	0.0012	0.0016	0.0032
	RMSE	0.1824	0.1321	0.1487	0.2506
Page modificado	K	0.3245 ± 0.03	0.3492 ± 0.04	0.3442 ± 0.05	0.3608 ± 0.03
	N	0.9140 ± 0.07	0.8966 ± 0.05	0.8486 ± 0.05	0.9863 ± 0.07
	R ²	0.9882	0.9945	0.9945	0.9941
	χ ²	0.0025	0.0013	0.0013	0.0009
	RMSE	0.1765	0.0260	0.0260	0.1306
Lewis	K	0.2184 ± 0.02	0.1903 ± 0.03	0.2806 ± 0.03	0.2908 ± 0.03
	R ²	0.9761	0.9739	0.9933	0.9941
	χ ²	0.0025	0.0052	0.0013	0.0009
	RMSE	0.1760	0.2861	0.1211	0.1306

*Valores promedio ± la desviación estándar (n=3).

Durante la deshidratación, el movimiento del agua hacia la superficie del pescado va acompañado de la migración de sal (Kilic, 2009), debido a la inmersión de las muestras en solución salina previa a la deshidratación, lo que lleva a un aumento de los niveles de ceniza (Deng *et al.*, 2014).

La menor composición en ceniza (8.29 y 8.97 g/100g) se presentó en los tratamientos US15 y US30, respectivamente, los cuales mostraron diferencias significativas ($P < 0.05$) respecto a los tratamientos C15 y C30. El valor más alto para el contenido de cenizas (14.52 g/100g) se obtuvo con el tratamiento C30, mismo que fue estadísticamente diferente al resto de los tratamientos.

Además, se encontraron ligeras variaciones en el contenido del extracto etéreo entre todos los tratamientos, siendo 8.95 g/100 g el valor más bajo del tratamiento C30, el cuál mostró una diferencia significativa ($P < 0.05$) con respecto a los demás tratamientos. Los tratamientos US15 y US30 no mostraron diferencias significativas ($P < 0.05$). El mayor valor de extracto etéreo fue para el tratamiento C15 con un valor de 11.11 g/100 g.

El color de los alimentos secos tiene una gran influencia en la aceptabilidad del producto por parte de los consumidores, viéndose reflejado directamente en la serie de cambios bioquímicos, microbiológicos y fisiológicos en el tejido muscular (Li *et al.*, 2017).

Tabla 10. Efecto de pretratamiento con ultrasonido en la composición química de los cubos de filete de tilapia deshidratados.

Componente	Tratamientos (g/100 g)				
	Tilapia fresca	C15	C30	US15	US30
Humedad	78.08±0.14	13.02±0.07 ^c	12.18±0.76 ^c	10.95±0.32 ^b	8.87±0.32 ^a
Proteína (N x 6.25)	18.98±0.44	62.46±0.83 ^d	64.17±0.88 ^c	70.02±0.91 ^b	72.92±0.9 ^a
Extracto etéreo	1.82 ±0.01	11.11±0.75 ^c	8.95±0.23 ^a	9.8±0.49 ^b	9.18±0.49 ^b
Cenizas	1.00 ±0.51	13.24±0.53 ^b	14.52±0.10 ^c	8.29±0.57 ^a	8.97±0.57 ^a

Valores promedio ± la desviación estándar (n=3). Los valores medios dentro de la misma fila con diferente superíndice indican diferencia significativa ($P < 0.05$).

La Tabla 11 muestra los parámetros de color L^* , a^* y b^* de los cubos de filete de tilapia deshidratados. En la determinación de L^* se observó que el valor más alto (50.48) se obtuvo con el tratamiento US15, mismo que fue estadísticamente diferente al resto de los tratamientos ($P < 0.05$). El tratamiento C30 registró el valor más bajo para L^* (48.17), el cual no fue estadísticamente diferente ($P > 0.05$) de los tratamientos C15 y US30.

Lo anterior, se atribuye a que el ultrasonido causa daño físico y contribuye a la fácil elución de pigmentos (Deng y Zhao, 2008). No se observaron diferencias

significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos para los valores de a^* y b^* , probablemente a la baja temperatura de la deshidratación. Deng *et al.*, (2014) estudiaron la deshidratación de los filetes de calamar con aire a 60 °C y reportaron una decoloración de las muestras debido a la desnaturalización de la mioglobina y la oxidación de pigmentos en el músculo, causada por la alta temperatura de deshidratación. Por otro lado, Ortiz *et al.* (2013) informaron que no se presentaron cambios de color en los filetes de salmón deshidratados con aire a 40 y 50 °C en relación a la muestra fresca, sin embargo, se presentó degradación (decoloración y/o oxidación) con un incremento de temperatura de 60 °C. Además, Li *et al.*, (2017) estudiaron cambios de color en la deshidratación de filetes de tilapia pretratados con ultrasonido a diferentes potencias y secados con bomba de calor, reportando que el aumento de la potencia ultrasónica produjo una deformación celular más severa, lo que podría inhibir la reacción de las enzimas oxidantes durante la deshidratación.

Tabla 11. Valores de color y actividad de agua de los cubos de tilapia deshidratados

Propiedades	Tratamientos			
	C15	C30	US15	US30
Color				
L^*	48.36±1.04 ^b	48.17±1.03 ^b	50.48±0.83 ^a	48.42 ±0.86 ^b
a^*	4.60±0.33 ^b	4.65±0.28 ^b	4.52±0.44 ^a	4.56±0.30 ^{ab}
b^*	21.70±0.74 ^b	20.06±0.88 ^c	24.06±0.64 ^a	22.96±0.93 ^b
a_w	0.442±0.002 ^b	0.551±0.001 ^c	0.403±0.003 ^a	0.542±0.04 ^c

Valores promedio ± la desviación estándar de tres muestras medidas en cada experimento, tres repeticiones. Los valores medios dentro de la misma fila con diferente superíndice indican diferencia significativa ($P < 0.05$).

Como se aprecia en la Tabla 11, las muestras pretratadas con US mostraron un contenido de humedad más bajo y, en consecuencia, valores de a_w más bajos. Los valores de a_w observados para los cubos de filete de tilapia deshidratados se encuentran por debajo del nivel límite de este parámetro, garantizando así la estabilidad microbiana, porque generalmente en otros alimentos se aceptaría que no ocurrirá crecimiento microbiano a valores de $a_w < 0.66$ (Ulloa *et al.*, 2015).

La calidad microbiológica aceptable de los alimentos deshidratado depende ampliamente del tipo de alimento procesado y del grupo microbiológico a evaluar. Los resultados de los recuentos microbiológicos de cubos de filete de tilapia deshidratados se muestran en la Tabla 12, donde los recuentos microbiológicos de bacterias aerobias mesófilas totales, coliformes totales y fecales, mohos y levaduras no fueron detectables en las condiciones aplicadas. En el producto fresco, se observó crecimiento de coliformes totales y bacterias mesófilas aeróbicas, pero éstas se eliminaron con el proceso de deshidratación. En las muestras deshidratadas pretratadas con US no se observó crecimiento de microorganismos.

Tabla 12. Características microbiológicas de los cubos de filete de tilapia deshidratados

Microorganismo	Tilapia fresca	Tratamientos (UFC/g)			
		C15	C30	US15	US30
Mesófilos areobios	25	<10	<10	<10	<10
Mohos y levaduras	<10	<10	<10	<10	<10
Coliformes totales	19	<10	<10	<10	<10
Coliformes fecales	<10	<10	<10	<10	<10

7.3 Análisis de la microestructura

El efecto del pretratamiento con ultrasonido sobre la estructura de cubos de filete de tilapia deshidratados se observó mediante una serie de imágenes de SEM. Las imágenes de SEM mostraron diferencias entre las muestras deshidratadas pretratadas y no tratadas con ultrasonido (Figura 4). En muestras control (a y c) no se encontraron estructuras y poros abiertos en comparación con las muestras pretratadas con US (b y d). La modificación microestructural mediante pretratamiento ultrasónico se debe a la cavitación acústica, que da como resultado una estructura celular dañada (Niamnuy *et al.*, 2014), lo que facilita la eliminación de agua durante la deshidratación (Fernandes y Rodrigues, 2007).

En el tratamiento US30, la estructura celular se apreció con grandes espacios intercelulares que facilitaron el movimiento del agua, lo que provocó como resultado

un acortamiento del tiempo de deshidratación en comparación con los tratamientos US15 y controles.

En otros alimentos se observaron patrones similares de acortamiento del tiempo de deshidratación usando el ultrasonido como pretratamiento (De la Fuente-Blanco *et al.*, 2006; Ozuna *et al.*, 2013 Ricce *et al.*, 2016).

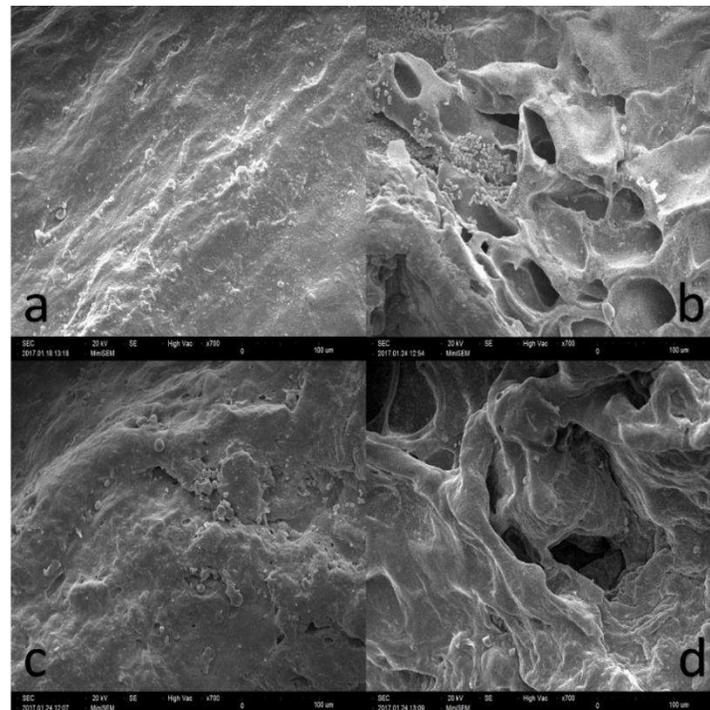


Figura 4. Micrográficas de cubos de tilapia deshidratados obtenidas con microscopio electrónico de barrido, a) muestra control 15 min, b) muestra pretratada con US durante 15 min, c) muestra control 30 min y d) muestra pretratada con US durante 30 min.

7.4 Características de rehidratación

La rehidratación es un aspecto fundamental en el proceso de deshidratación. En este fenómeno, se involucran diferentes mecanismos físicos: absorción de agua en el producto deshidratado, difusión de moléculas de agua a través de la red porosa e hinchazón (Prosapio y Norton, 2017).

La capacidad de absorción de agua de los productos biológicos está relacionada con el tipo de material, la ultraestructura y la composición de las células (García-Pascual *et al.*, 2005). Las cinéticas de absorción de agua de los cubos de filete de tilapia deshidratados se afectaron por los pretratamientos con ultrasonido y la temperatura de rehidratación como se muestra en la Figura 3.

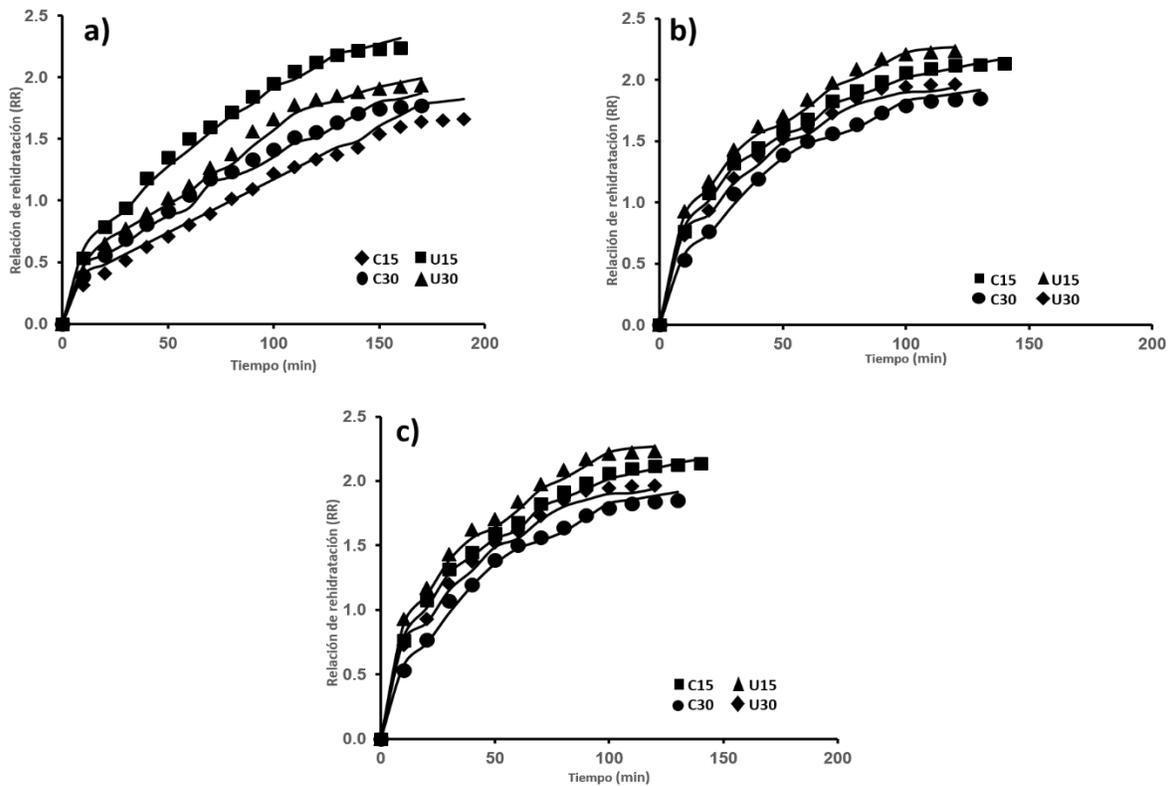


Figura 5. Cinéticas de rehidratación de los cubos de filete de tilapia deshidratados y el ajuste de los datos experimentales al modelo de Peleg, realizada a: a) 30 °C, b) 40 °C y c) 50 °C. Los puntos representan los valores experimentales.

Las cinéticas exhibieron inicialmente una alta tasa de absorción de agua seguida de tasas de absorción progresivamente más bajas. Además, a una temperatura de rehidratación más alta se observó un menor tiempo de rehidratación. Las muestras con pretratamiento ultrasónico a los 15 y 30 min mostraron mayor capacidad de rehidratación en comparación con las muestras no tratadas, lo que puede atribuirse a la formación porosa (Zhang *et al.*, 2016) y a la formación de microcanales (Wang *et al.*, 2015) de los cubos de tilapia.

También se observó que con 15 min de tratamiento con US previo a la deshidratación (Figura 5a), el tiempo de rehidratación de los cubos de tilapia fue menor a las tres temperaturas de remojo en comparación con las muestras control y el pretratado con US por 30 min. Estos resultados indican que la tasa de rehidratación está influenciada por los cambios estructurales producidos por el pretratamiento con ultrasonido y el proceso de deshidratación. Algunos patrones de rehidratación similares a los de este estudio, que utilizaron ultrasonido como pretratamiento se han descrito en muchos alimentos como en fresa (Gamboa-Santos *et al.*, 2014), zanahoria (Ricce *et al.*, 2016) y frijol azufrado (Resendiz *et al.*, 2015). Los datos de rehidratación obtenidos de los experimentos de este estudio se ajustaron a los modelos matemáticos mencionados en la Tabla 7. Los parámetros cinéticos obtenidos se resumen en las Tablas 13, 14, 15 y 16. El modelo de primer orden fue el que describió mejor la rehidratación de cubos de filete de tilapia deshidratados ya que obtuvo los valores más altos de R^2 y los valores más bajos de χ^2 y RMSE. De todos los modelos probados, el modelo de primer orden fue el que mejor se adaptó a las diferentes condiciones para la rehidratación de cubos de tilapia.

Tabla 13. Parámetros cinéticos y estadísticos de las cinéticas de absorción de agua de los cubos de filete de tilapia deshidratados de acuerdo al modelo de primer orden.

Temperatura de remojo	Tratamientos	Parámetros cinéticos y estadístico			
		k	R ²	χ ²	RMSE
30 °C	C15	0.36±0.01	0.9956	0.0024	0.1725
	US15	0.48±0.06	0.9954	0.0039	0.1729
	C30	0.38±0.01	0.9959	0.0024	0.1492
	US30	0.41±0.01	0.9933	0.0048	0.2503
40 °C	C15	0.39±0.015	0.9917	0.0062	0.2152
	US15	0.51±0.008	0.9904	0.2654	0.0099
	C30	0.43±0.007	0.9979	0.0013	0.1068
	US30	0.49±0.005	0.9941	0.0044	0.1713
50 °C	C15	0.41±0.02	0.9926	0.0048	0.1906
	US15	0.58±0.05	0.9927	0.0057	0.1066
	C30	0.49±0.05	0.9936	0.0046	0.1371
	US30	0.54±0.02	0.9708	0.0096	0.2550

*Valores promedio (n=3) ± la desviación estándar.

Tabla 14. Parámetros cinéticos y estadísticos de las cinéticas de absorción de agua de los cubos de tilapia deshidratados de acuerdo al modelo de Weibull.

Temperatura de remojo	Tratamientos	Parámetros				
		α	β	R ²	χ ²	RMSE
30 °C	C15	0.64±0.05	27.74±0.06	0.7019	0.1720	1.2473
	US15	0.57±0.02	19.63±0.53	0.8764	0.1114	0.7869
	C30	0.69±0.08	25.42±0.06	0.7193	0.1417	1.0368
	US30	0.69±0.02	25.20±0.77	0.8124	0.1258	1.0261
40 °C	C15	0.52±0.01	25.27±0.89	0.8737	0.0950	0.5684
	US15	0.43±0.01	16.97±0.16	0.8833	0.1014	0.5263
	C30	0.54±0.13	21.92±0.45	0.7980	0.1252	0.7165
	US30	0.41±0.01	18.45±0.78	0.8302	0.0805	0.6568
50 °C	C15	0.42±0.01	20.39±0.84	0.6977	0.1628	1.2565
	US15	0.40±0.01	14.63±0.32	0.8007	0.1758	0.9544
	C30	0.49±0.01	21.58±0.51	0.9090	0.0998	0.6491
	US30	0.44±0.06	20.11±0.95	0.8434	0.1371	0.8225

*Valores promedio (n=3) ± la desviación estándar.

Tabla 15. Parámetros cinéticos y estadísticos de las cinéticas de absorción de agua de los cubos de tilapia deshidratados de acuerdo al modelo exponencial

Temperatura de remojo	Tratamientos	Parámetros			
		k	R ²	χ ²	RMSE
30 °C	C15	0.34±0.01	0.9941	0.4800	0.1748
	US15	0.47±0.01	0.9948	0.0045	0.1840
	C30	0.37±0.01	0.9940	0.0033	0.1607
	US30	0.34±0.01	0.9919	0.0055	0.2459
40 °C	C15	0.37±0.02	0.9847	0.0062	0.2152
	US15	0.54±0.01	0.9857	0.2654	0.0099
	CS30	0.43±0.01	0.9976	0.0013	0.1068
	US30	0.49±0.01	0.9928	0.0044	0.1713
50 °C	C15	0.47±0.02	0.8360	0.1088	0.1906
	U15	0.60±0.05	0.9945	0.0048	0.1066
	C30	0.50±0.05	0.9926	0.0046	0.1371
	U30	0.56±0.02	0.9922	0.0096	0.2550

*Valores promedio (n=3) ± la desviación estándar.

Tabla 16. Características de absorción de agua de los cubos de tilapia deshidratados siguiendo el modelo Peleg.

Temperatura de remojo	Tratamiento	Parámetros				
		k ₁	k ₂	R ²	χ ²	RMSE
30 °C	C15	0.88 ± 0.03	6.25 ± 0.50	0.9671	0.0156	0.1043
	U15	0.64 ± 0.02	8.22 ± 0.04	0.9584	0.0470	0.1704
	C30	0.84 ± 0.07	7.02 ± 0.04	0.9672	0.0193	0.0942
	U30	0.60 ± 0.02	7.56 ± 0.10	0.9567	0.0445	0.1541
40 °C	C15	0.85 ± 0.01	7.21 ± 0.21	0.9650	0.0481	0.1708
	U15	0.49 ± 0.04	8.43 ± 0.19	0.9527	0.0808	0.2123
	C30	0.82 ± 0.02	7.49 ± 0.38	0.9606	0.6693	0.1942
	U30	0.64 ± 0.01	8.42 ± 0.25	0.9509	0.0894	0.2303
50 °C	C15	0.83 ± 0.01	7.79 ± 0.22	0.9706	0.0217	0.1013
	U15	0.43 ± 0.02	8.84 ± 0.09	0.9529	0.0919	0.2207
	C30	0.78 ± 0.01	8.53 ± 0.08	0.9688	0.0362	0.1407
	U30	0.66 ± 0.03	8.52 ± 0.04	0.9536	0.0648	0.1812

*Valores promedio (n=3) ± la desviación estándar.

7.5 Índices de rehidratación

La Tabla 17 muestra los valores del índice de rehidratación (DHC, WAC y RA) durante la rehidratación realizada a 30, 40 y 50 °C para cubos de filete de tilapia deshidratados. Las condiciones de los pretratamientos ultrasónicos no tuvieron un efecto significativo ($P > 0.05$) en el índice DHC en comparación con las muestras control lo cual que indican la alta capacidad de retención de solutos durante el proceso.

Las muestras pretratadas con ultrasonido mostraron una diferencia significativa ($P < 0.05$) en el índice WAC y RA en comparación con las muestras control a 50 °C. Esto se debe al efecto del pretratamiento con ultrasonido, así como a la baja temperatura utilizada durante el proceso de deshidratación que mejora la capacidad de las muestras para absorber agua.

Por otro lado, el uso de altas temperaturas durante la deshidratación de los alimentos conduce a cambios químicos, modificaciones físicas y mecánicas, formación de una capa en la superficie y reducción de la capacidad de hidratación de las proteínas (Ozuna *et al.*, 2013).

Tabla 17. Valores de la capacidad de retención de materia seca (DHC), capacidad de absorción de agua (WAC) y capacidad de rehidratación (RA) de los cubos de tilapia deshidratados, rehidratados a 30, 40 y 50 ° C.

Temperatura de remojo (°C)	Tratamiento	Índices		
		WAC	DHC	RA
30	C15	0.82 ±0.02 ^e	1.00 ±0.01 ^a	0.82 ±0.02 ^e
	US15	0.88 ±0.01 ^b	1.00 ±0.01 ^a	0.88 ±0.01 ^b
	C30	0.84 ±0.02 ^d	1.00 ±0.01 ^a	0.84 ±0.02 ^b
	US30	0.85 ±0.02 ^c	1.00 ±0.01 ^a	0.85 ±0.02 ^c
40	C15	0.87 ±0.02 ^b	1.00 ±0.01 ^a	0.87 ±0.02 ^b
	US15	0.88 ±0.02 ^b	1.00 ±0.01 ^a	0.88 ±0.02 ^b
	CS30	0.84 ±0.02 ^d	1.00 ±0.01 ^a	0.84 ±0.02 ^d
	US30	0.88 ±0.01 ^b	1.00 ±0.01 ^a	0.88 ±0.01 ^b
50	C15	0.84 ±0.01 ^d	1.00 ±0.01 ^a	0.84 ±0.01 ^d
	US15	0.90 ±0.01 ^a	1.00 ±0.01 ^a	0.90 ±0.01 ^a
	C30	0.87 ±0.02 ^b	1.00 ±0.01 ^a	0.87 ±0.02 ^b
	US30	0.90 ±0.02 ^a	1.00 ±0.01 ^a	0.90 ±0.02 ^a

*Valores promedio ± la desviación estándar (n=3). Los valores medios dentro de la misma fila con diferente superíndice indican diferencia significativa ($P < 0.05$).

7.6 Coeficiente de difusión (D_{eff}) y energía de activación (E_a)

Los valores de D_{eff} a 30 °C de las muestras de control de 15 y 30 min fueron 6.30×10^{-09} y 6.35×10^{-09} m/s² respectivamente y aumentaron a 9.26×10^{-09} y 8.82×10^{-09} m/s² a 50 °C. Para muestras pretratadas con ultrasonido durante 15 y 30 min, se encontraron valores D_{eff} de 7.17×10^{-09} y 6.80×10^{-09} a 30 °C, respectivamente y un aumento a 9.80×10^{-09} y 9.74×10^{-09} a 50 °C. Como era de esperar, las muestras pretratadas con ultrasonido exhibieron valores de D_{eff} más altos en comparación con las muestras de control, atribuidas al hecho de que el ultrasonido facilita la transferencia de masa (Musielak *et al.*, 2016). Los D_{eff} calculados en este estudio concuerdan con el orden de magnitud reportado entre 10^{-8} y 10^{-12} para materiales biológicos (Başlar *et al.*, 2014).

Por otra parte, los valores de E_a para los tratamientos C15, US15, C30 y US30 fueron 15.88, 12.67, 13.39 y 14.49 kJ/mol, respectivamente. Esto sugiere que la sensibilidad de la difusividad debida al ultrasonido es menor en las muestras pretratadas con US durante 15 minutos, dado su menor valor de E_a , lo que se traduce en una mayor facilidad de entrada del agua al material (Agudelo y Franco, 2009). Los valores de E_a obtenidos en este estudio para cubos de tilapia deshidratados correspondientes a los distintos tratamientos se encuentran dentro del rango general de 11-110 kJ / mol reportado para diferentes materiales (Doymaz, 2012).

Tabla 18. Difusividad efectiva (D_{eff}) y energía de activación (E_a) para rehidratación de los cubos de tilapia deshidratados.

Tratamientos	Temperatura de remojo (°C)	D_{eff} (m ² /s)*	E_a (kJ/mol)	R ²
C15	30	6.30 x 10 ⁻⁰⁹ ±1.23 x 10 ⁻⁰⁹ a	15.88	0.9978
	40	7.81 x 10 ⁻⁰⁹ ±1.00 x 10 ⁻⁰⁹ b		
	50	9.26 x 10 ⁻⁰⁹ ±1.05 x 10 ⁻¹⁰ d		
US15	30	7.17 x 10 ⁻⁰⁹ ±9.44 x 10 ⁻¹⁰ b	12.67	0.9750
	40	8.80 x 10 ⁻⁰⁹ ±3.28 x 10 ⁻¹⁰ c		
	50	9.80 x 10 ⁻⁰⁹ ±1.14 x 10 ⁻⁰⁹ d		
C30	30	6.35 x 10 ⁻⁰⁹ ±7.22 x 10 ⁻¹⁰ a	13.39	0.9898
	40	7.74 x 10 ⁻⁰⁹ ±8.60 x 10 ⁻¹⁰ b		
	50	8.82 x 10 ⁻⁰⁹ ±9.12 x 10 ⁻¹⁰ c		
US30	30	6.80 x 10 ⁻⁰⁹ ±3.91 x 10 ⁻¹⁰ a	14.49	0.9997
	40	8.14 x 10 ⁻⁰⁹ ±1.05 x 10 ⁻⁰⁹ c		
	50	9.74 x 10 ⁻⁰⁹ ±2.58 x 10 ⁻¹⁰ d		

*Valores promedio ± la desviación estándar. Valores en la columna con diferente superíndice indican diferencia significativa (P <0.05).

8. CONCLUSIONES

El ultrasonido como pretratamiento para la deshidratación de cubos de filete de tilapia puede utilizarse efectivamente para reducir el tiempo de secado con aire a baja temperatura, contribuyendo en la retención del color y estabilidad del producto deshidratado.

El pretratamiento con US mejora la capacidad de retención de sólidos durante y la difusividad efectiva en la rehidratación de cubos de filete de tilapia deshidratados.

Los modelos de Page y primer orden pueden utilizarse efectivamente para modelar las cinéticas de deshidratación y rehidratación de cubos de filete de tilapia, respectivamente.

La microscopia electrónica de barrido reveló que el ultrasonido como pretratamiento, modifica la microestructura de los cubos de filete de tilapia, mostrando una estructura más porosa, lo cual puede contribuir a una mejor transferencia de masa durante la deshidratación y rehidratación de los cubos de filete de tilapia

9. LITERATURA CITADA

- Agudelo, J.F., y Franco, R.A. (2009). Aplicación de la ley de Fick y el modelo de Peleg para estudiar la absorción de agua en el frijol cargamento ombligo amarillo (*Phaseolus vulgaris L.*) y la arveja seca (*Pisum sativa*) durante la rehidratación. *Revista Publicaciones e Investigación*, 3(1),15-28.
- AOAC (1995). Official Methods of Analysis (16th Ed.). Virginia, Association of Official Analytical Chemists.
- Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D., y Youssef M. M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*, 48(2), 410-427.
- Başlar, M., Kılıçlı, M., Toker, O. S., Sağdıç, O., y Arıcı, M. (2014). Ultrasonic vacuum drying technique as a novel process for shortening the drying period for beef and chicken meats. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 26, 182-190.
- Başlar, M., Kılıçlı, M., y Yalınkılıç, B. (2015). Dehydration kinetics of salmon and trout fillets using ultrasonic vacuum drying as a novel technique. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27, 495-502.
- Bermúdez-Aguirre., y Barbosa-Cánovas, G.V. (2012). Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* in pineapple, grape and cranberry juices under pulsed and continuous thermo-sonication treatments. *Journal of Food Engineering*, 108(3), 383-392.
- Bilbao-Sáinz, C., Andrés, A., Andrés, A., y Fito, P. (2005). Hydration kinetics of dried apple as affected by drying conditions. *Journal of Food Engineering*, 68. 369-376.

- Brown, T.L., LeMay, H.E., Bursten, B.E., y Burdge, J.R. (2009). Química. La Ciencia Central. México. Pearson. 11ª Edición. 544-548.
- Cerón, A. F., Latorre, L. I., Bucheli, M. A., Osorio, O., Mejía, D. F., y Garcés, L. F. (2015). Determinación de constantes de velocidad de rehidratación y cambios sobre algunas propiedades físicas en semillas de arveja (*Pisum sativum* L.). *Revista Lasallista de Investigación*, 12(1), 21-32.
- Chemat, F., Zill-e-Huma., y Khan M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 813-35.
- Chen, Z.-G., Guo, X.-Y., y Wu, T. (2016). A novel dehydration technique for carrot slices implementing ultrasound and vacuum drying methods. *Ultrasonics Sonochemistry*, 30, 28-34.
- Cheng, X., Zhang, M., Xu, B., Adhikari, B., y Sun, J. (2015). The principles of ultrasound and its application in freezing related processes of food materials: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27, 576–85.
- Chukwu Ogbonnaya. (2009). Influences of Drying Methods on Nutritional Properties of Tilapia Fish (*Oreochromis niloticus*). *World Journal of Agricultural Sciences*, 5(2): 256 – 258.
- Corrêa, J. L. G., Rasia, M. C., Mulet, A., y Cárcel, J. A. (2017). Influence of ultrasound application on both the osmotic pretreatment and subsequent convective drying of pineapple (*Ananas comosus*). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 41, 284–291.
- Cox, S., Gupta, S., y Abu-Ghannam, N. (2012). Effect of different rehydration temperatures on the moisture, content of phenolic compounds, antioxidant capacity and textural properties of edible Irish Brown seaweed. *LWT-Food Science and Technology*, 47, 300-307.

- CONAPESCA. (2013). Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca. Tilapia. Anuario Estadístico de Acuacultura y Pesca. Disponible en: <https://www.gob.mx/conapesca/documentos/anuario-estadistico-de-acuacultura-y-pesca>.
- CONAPESCA. (2016). Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca. Disponible en: <https://www.gob.mx/conapesca/articulos/presenta-produccion-de-tilapia-incremento-de-un-15-6-por-ciento-en-2016?idiom=es>
- Cunningham, S.E., McMin, W.A.M., Magee, T.R.A., y Richardson, P.S. (2007). Modelling water absorption of pasta during soaking. *Journal of Food Engineering*, 82(4), 600-607.
- Darvishi, H. (2013). Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 12, 121-127.
- De la Fuente-Blanco, S., Riera-Franco de Sarabia, E., Acosta-Aparicio, V.M., Blanco-Blanco, A., y Gallego-Juárez, J.A. (2006). Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44(1), 523.
- Delgado, J.A. (2011). Aplicación del ultrasonido en la industria de alimentos. *Revista Especializada en Ingeniería de Procesos en Alimentos y Biomateriales*, 6, 141-152.
- Deng, Y., y Zhao, Y. (2008). Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji). *LWT - Food Science and Technology*, 41(9), 1575–1585.
- Deng, Y., Luo, Y., Wang, Y., Yue, J., Liu, Z., Zhong, Y., y Zhao, Y. (2014). Drying-induced protein and microstructure damages of squid fillets affected moisture distribution and rehydration ability during rehydration. *Journal of Food Engineering*, 123, 23-31.

- Djendoubi, N., Boudhrioua, N., Bonazzi, C., y Kechaou, N. (2008). Drying of sardine muscles: Experimental and mathematical investigations. *Food and Bioproducts Processing*, 87, 115-123.
- Doymaz, I. (2012). Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki* L.), *Energy Conversion and Management*, 56, 199-205.
- FAO (2014). Manual básico sobre procesamiento e inocuidad de productos de la acuicultura. Disponible en: www.fao.org/3/a-i3835s.pdf
- FIRCO (2017). Producción de tilapia a través de la acuicultura. Disponible en: <https://www.gob.mx/firco/articulos/producción-de-tilapia-a-traves-de-la-acuicultura?idiom=es>
- Fernandes, F. N., y Rodrigues, S. (2007). Ultrasound application as pre-treatment for drying of fruits: dehydration of banana, *Journal of Food Engineering*, 82, 261-267.
- Fernandes, F. N., Gallao M.I y Rodrigues, S. (2008). Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: melon dehydration, *LWT-Food Science and Technology*, 41, 604-610.
- Galvão, M., y da Silva, R. (2017). Combined osmotic dehydration and drying process of pirarucu (*Arapaima gigas*) fillets. *Journal of Food Science and Technology*, 54, 3170-3179.
- Gamboa-Santos, J., Montilla, A., Soria, A. C., Cárcel, J. A., García-Pérez, J. V., y Villamiel, M. (2014). Impact of power ultrasound on chemical and physicochemical quality indicators of strawberries dried by convection. *Food Chemistry*, 161, 40-6.
- García-Pascual, P., Sanjuan, N., Bon, J., Carreres, J., y Mulet, A. (2005). Rehydration process of *Boletus edulis* mushroom: characteristics and modelling. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 85, 1397-1404.

Gil, A. (2010). Tratado de nutrición: Composición y calidad nutritiva de los alimentos. Editorial Panamericana, Vol.2. (ISBN 978-84-9835-347-1).

Gómez Díaz J., y López M. (2009). Aplicaciones del ultrasonido en el tratamiento de alimentos. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*. Disponible en [http://www.udlap.mx/WP/tsia/files/No3-Vol-1/TSIA-3\(1\)-Gomez-Diaz-et-al-2009.pdf](http://www.udlap.mx/WP/tsia/files/No3-Vol-1/TSIA-3(1)-Gomez-Diaz-et-al-2009.pdf)

Guan, Z., Wang, X., Li, M., y Jiang, X. (2013). Mathematical Modeling on Hot Air Drying of Thin Layer Fresh Tilapia Fillets. *Polish Journal of Food and Nutrition Science*, 63, 25–34.

Guiné, R.P., Ramos, M.A., y Figueiredo, M. (2007). Shrinkage characteristics and porosity of pears during drying. *Drying Technology*, 24, 1525-1530.

Haq, R., Kumar, P., y Prasad, K. (2016). Effect of microwave treatment on dehydration kinetics and moisture diffusivity of Asiatic Himalayan black carrot. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(4), 463-470.

Hartel, R.W., y Heldman, D.R. (2012). Principles of Food Processing. Aspen Publishers, 178-187.

Hashtjin, A. M., y Abbasi, S. (2015). Nano-emulsification of orange peel essential oil using sonication and native gums. *Food Hydrocolloids*, 44, 40–48.

Jain, D., y Pathare, P. B. (2007). Study the drying kinetics of open sun drying of fish. *Journal of Food Engineering*, 78, 1315–1319.

Jangam, S. V., Law, C. L., y Mujumdar, A. S. (2010). Drying of Foods, Vegetables and Fruits. Vol. 1. (E-book, ISBN 978-981-08-6759-1).

- Kadam, S. U., Tiwari, B. K., y O'Donnell, C. P. (2015). Effect of ultrasound pre-treatment on the drying kinetics of brown seaweed. *Ascophyllum nodosum*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 23, 302–7.
- Karim, A., y Hawlader, M.N.A. (2005). Drying characteristics of banana : theoretical modelling and experimental validation, *Journal of Food Engineering*, 70, 35-45.
- Kavak, A. E., y Bicer, Y. (2005). Modelling of the drying of eggplants in thin-layers. *International Journal of Food Science and Technology*, 40, 273-281.
- Kilic, A. (2009). Low temperature and high velocity (LTHV) application in drying: Characteristics and effects on the fish quality. *Journal of Food Engineering*. 91, 173-182.
- Krokida, M.K., y Marinos-Kouris D. (2003). Rehydration kinetics of dehydrated products, *Journal of Food Engineering*, 57, 1-7.
- Lango-Reynoso, V., Reta-Mendiola, J.L., y Asiain-Hoyos, A. (2015). Estrategía local de comercialización de tilapia viva (*Oreochromis spp.*), en Veracruz, México ante la competencia internacional. Colpos. *Agroproductividad*. 33-37. Disponible en: https://www.colpos.mx/wb_pdf/Veracruz/2015_div/caso_div_3.pdf
- Li, M., Wu, Y., y Guan, Z. (2017). Effect of physical osmosis methods on quality of tilapia fillets processed by heat pump drying, *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 67(2), 145-150.
- Lucatero García, J., y Domínguez Aguirre, L. (2015). La gestión estratégica en la producción de tilapia. Caso de la granja acuícola INECAP en Tomatlán, Jalisco, México. *Revista Ciencias Estratégicas*, 23 (34), 321-329.

- Maldonado, S., Arnau, E., y Bertuzzi, M. A. (2010). Effect of temperature and pretreatment on water diffusion during rehydration of dehydrated mangoes. *Journal of Food Engineering*, 96(3), 333–341.
- Marabi, A., y Saguy, I. S. (2004). Effect of porosity on rehydration of dry food particulates. *Journal of the science of Food and Agriculture*, 84, 1105-1110.
- Marín B, E., Lemus M, R., Flores M, V., y Vega G, A. (2006). La rehidratación de alimentos deshidratados. *Revista Chilena de Nutrición*, 33(3), 527–538
- Miano, A. C., Ibarz, A., y Duarte E.P.E. (2016). Mechanisms for improving mass transfer in food with ultrasound technology: Describing the phenomena in two model cases. *Ultrasonics Sonochemistry*, 29, 413–9.
- Mierzwa, D., y Kowalski, S. (2016). Ultrasound-assisted osmotic dehydration and convective drying of apples: process kinetics and quality issues. *Chemical and Process Engineering*. 37(3), 383-391.
- Minjares-Fuentes, R., Femenia, A., Garau, M. C., Candelas-Cadillo, M. G., Simal, S., y Rosselló, C. (2016). Ultrasound-assisted extraction of hemicelluloses from grape pomace using response surface methodology. *Carbohydrate Polymers*. 138, 180-91.
- Misra, M. K., y Brooker, D. B. (1980). Thin-layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 23, 1254-1260.
- Muñoz, I., Arnau, J., y Gou, P. (2012). Rehydration kinetics at 5 and 15 °C of dry salted meat. *Journal of Food Engineering*, 110, 465–471
- Musielak, G., Mierzwa, D., y Kroehnke, J. (2016). Food drying enhancement by ultrasound - A review. *Trends in Food Science & Technology*, 56, 126-141.

- Niamnuy, C., Devahastin, S., y Soponronnarit, S. (2014). Some recent advances in microstructural modification and monitoring of foods during drying: A review. *Journal of Food Engineering*, 123, 148-156.
- Norma Oficial Mexicana NOM-092-SSA1-1994. Bienes y Servicios. Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa. Diario Oficial de la Federación, 10 de noviembre de 1995.
- Norma Oficial Mexicana NOM-111-SSA1-1994. Bienes y Servicios. Método para a cuenta de mohos y levaduras en alimentos. Diario Oficial de la Federación, 10 de mayo de 1995.
- Norma Oficial Mexicana NOM-113-SSA1-1994. Bienes y Servicios. Método para la cuenta de microorganismos coliformes totales en placa. Diario Oficial de la Federación, 10 de mayo de 1995.
- 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.
- Oliveira, A.L., Colnaghi, B.G., Silva, D.Z.E., Gouvéa, R.I., Vieira, R.L., y Augusto, P.E.D. (2013). Modelling the effect of temperature on the hydration kinetic of adzuki beans (*Vigna angularis*). *Journal of Food Enginering*, 18, 417-420.
- Ortiz, J., Lemus-Mondaca, R., Vega-Gálvez A., Ah-Hen, K., Puente-Diaz L., Zura-Bravo, L., y Santiago A. (2013). Influence of air-drying temperature on drying kinetics, colour, firmness and biochemical characteristics of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fillets. *Food chemistry*, 139, 162-169.
- Ozuna, C., Puig, A., García-Pérez, J.V., Mulet, A., y Cárcel, J.A. (2013). Influence of high intensity ultrasound application on mass transport, microstructure and textural properties of pork meat (*Longíssimus dorsi*) brined at different NaCl concentrations. *Journal of Food Engineering*, 119, 84-93.

- Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53, 1216-1219.
- Pérez Julio E., Muñoz Carlos, Huaquin Laura y Nirchio Mauro. (2004). Riesgos de la introducción de tilapias (*Oreochromis sp.*) (*Perciformes: Cichlidae*) en ecosistemas acuáticos de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77, 195-199.
- Pérez-Fuentes, J. L., Pérez-Rostro, C.I., Hernández-Vergara, M.P., Amaro-Espejo, I.A., y Huicab-Pech, Z. (2016). Comparación e interacción genotipo-ambiente del desempeño productivo en tres líneas genéticas de tilapia *Oreochromis sp.* *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 19, 11-17.
- Prosapio, V., y Norton, I. (2017). LWT - Food Science and Technology Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze-drying performance. *LWT - Food Science and Technology*, 80, 401-408.
- Resendiz Vazquez, J.A. (2013). Cinéticas de deshidratación y rehidratación de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) azufrado entero instantáneo. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nayarit, Pág. 28.
- Resendiz, J., Ulloa, J. A., Ulloa, P. R., Carmen, J., y Ramírez, J.C. (2015). Effect of dehydration conditions on the chemical, physical, and rehydration properties of instant whole bean (*Phaseolus vulgaris* L. var. Azufrado), *Journal of Chemistry*, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/131357>
- Ricce, C., Rojas, L. M., Miano, C., Siche, R., y Duarte, P.E. (2016). Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration. *Food Research International*. 89, 701–708.
- Robles-Ozuna I., Ochoa-Martinez, L. (2012). Ultrasonido y sus Aplicaciones en el Procesamiento de Alimentos. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 13(2), 109-122.

SAGARPA. (2016). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Conoce sobre el origen y producción de la tilapia (mojarra). Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/coahuila/boletines/Paginas/2016B15.aspx>.

Santos-Sánchez, N.F, Valadez-Blanco, R., Gómez-Gómez, M.S, Pérez-Herrera, A., y Salas-Coronado, R. (2012). Effect of roasting tray drying on antioxidant components, color and rehydration ratio of tomato saladette slices. *LWT- Food Science and Technology*, 46, 298-304.

Saavedra, M.A. (2006). Manejo del cultivo de tilapia. Disponible en: www.crc.uri.edu/download/MANEJO-DEL-CULTIVO-DE-TILAPIA_CIDEA.pdf

Schössler, K., Jäger, H., y Knorr, D. (2012). Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper. *Journal of Food Engineering*, 108, 103-110.

Seremet (Ceclu), L., Botez, E., Nistor, O.-V., Andronoiu, D. G., y Mocanu, G.-D. (2016). Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. *Food Chemistry*, 195, 104–109.

Tao, Y., Wang, P., Wang, Y., Kadam, S. U., Han, Y., Wang, J., y Zhou, J. (2016). Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry (*Morus alba L.*) leaves: Impact on drying kinetics and selected quality properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 310-318.

Tüfekçi, S., y Gökhan, S. (2017). Enhancement of drying and rehydration characteristics of okra by ultrasound pre-treatment application. *Heat Mass Transfer*, 53, 2279-2286.

Ulloa, J. A., Ibarra-Zavala, S. J., y Ramírez-Salas, S.P. (2015). Chemical, physicochemical, Nutritional, Microbiological, Sensory and Rehydration of

Instant Whole Beans (*Phaseolus vulgaris*). *Food Technology and Biotechnology*, 53, 48-56.

Vannuccini, S. (2003). Mercados Mundiales Para la Tilapia. Argentina. Disponible en http://www.produccionanimal.com.ar/produccion_peces/piscicultura/32-

Vázquez Vila M.J., Chenlo, F., Moreira, R., y Da Riva, P. Rehidratación de zanahorias previamente secadas con aire y deshidratadas osmóticamente. *Memorias del Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, realizado en Lugo del 26-28 de septiembre de 2007.

Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Clavería, R., Quispe, I., Vergara, J., Uribe, E., Páez, H., y Di, K. (2011). Effect of air temperature on drying kinetics and quality characteristics of osmo-treated jumbo squid (*Dosidicus gigas*). *LWT - Food Science and Technology*, 44, 16-23

Wang, H., Zhang, M., y Adhikari, B. (2015). Drying of shiitake mushroom by combining freeze-drying and mid-infrared radiation. *Food and Bioprocess Processing*, 94, 507-517.

Yao, Y. (2016). Enhancement of mass transfer by ultrasound: Application to adsorbent regeneration and food drying/dehydration. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 512-531.

Zhang, L., Huang, X., Miao, S., Zeng, S., Zhang, Y., y Zheng, B. (2016). Influence of ultrasound on the rehydration of dried sea cucumber (*Stichopus japonicus*). *Journal of Food Engineering*, 178, 203-211.

Zapata Montoya, J. E, Carvajal, L.M., y Ospina, N. (2002). Efectos de la concentración de solutos y la relación jarabe/fruta sobre la cinética de deshidratación osmótica de papaya en láminas. *Interciencia*, 27(5), 236-242.

Zielinska, M. Markowsky, M. (2016). The influence of microwave-assisted drying techniques on the rehydration behavior of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L. *Food Chemistry*, 196, 1188-1196.