



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

Efecto de la Aplicación del Ultrasonido Como  
Pretratamiento en el Secado de Betabel (*Beta Vulgaris*)

## **T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERA EN ALIMENTOS**

PRESENTA:

**ALBA NIDIA JUÁREZ GARCÍA**

ASESORES

DRA. MARTA ELVIA ROSAS MENDOZA

DRA. ROSALÍA MELÉNDEZ PÉREZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO

2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## ÍNDICE GENERAL

### RESUMEN

### INTRODUCCIÓN

### CAPITULO 1: ANTECEDENTES

1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL BETABEL .....	1
1.2 COLORANTES NATURALES DEL BETABEL .....	4
1.3 SECADO CONVECTIVO .....	6
1.3.1 NUEVAS TECNOLOGÍAS APLICADAS AL SECADO CONVECTIVO .....	9
1.3.2 SECADO INFRARROJO .....	9
1.4 TRANSFERENCIA DE MASA .....	12
1.5 ULTRASONIDO .....	15
1.5.1 PARÁMETROS ULTRASONICOS .....	18
1.5.2 EFECTO DEL ULTRASONIDO .....	22
1.5.3 SISTEMAS DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDO .....	25
1.5.4 PRETRATAMIENTO ULTRASÓNICO .....	26
1.5.5 VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL ULTRASONIDO .....	27

### CAPITULO 2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

OBJETIVOS .....	29
OBJETIVO GENERAL .....	29
OBJETIVOS PARTICULARES .....	29
2.1 SELECCIÓN DE MATERIA PRIMA .....	30
2.2 CONTENIDO DE SÓLIDOS SOLUBLES .....	30
2.3 CONTENIDO DE HUMEDAD .....	31
2.4 COLOR .....	31
2.5 ADAPTACIÓN DEL SISTEMA PARA LA APLICACIÓN DE ULTRASONIDO .....	32
2.6 PRETRATAMIENTO ULTRASÓNICO .....	35
2.6.1 PARÁMETROS ULTRASÓNICOS .....	35
2.7 PROCESO DE SECADO POR INFRARROJO .....	35
2.7.1 CÁLCULO DE DIFUSIÓN EFECTIVA .....	36
2.7.2 CINETICA DE LA DIFUSIÓN EFECTIVA .....	37

2.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	38
<b>CAPITULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	39
3.2 APLICACIÓN DE ULTRASONIDO .....	40
3.3 PRETRATAMIENTO ULTRASONICO .....	42
3.3.1 PARÁMETROS FISICOS Y QUIMICOS.....	42
3.3.2 PARAMETROS ULTRASÓNICOS .....	45
3.4 SECADO INFRARROJO .....	48
3.4.1 PARAMETROS FISICOS Y QUIMICOS.....	48
3.4.2 COMPORTAMIENTO DE LA HUMEDAD .....	50
3.4.3 DIFUSIÓN EFECTIVA .....	57
3.4.4 CINÉTICA DE LA TRANSFERENCIA DE MASA .....	58
CONCLUSIONES .....	60
BIBLIOGRAFÍA .....	61

### ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1: Información Nutrimental del Betabel .....	3
Cuadro 2: Fenómenos de transferencia de masa.....	13
Cuadro 3: Medidas y posiciones del baño ultrasónico .....	33
Cuadro 4: Configuración del osciloscopio .....	34
Cuadro 5: Amplitud de onda promedio en diferentes zonas .....	40
Cuadro 6: Características físicas y químicas del betabel con pretratamiento.....	43
Cuadro 7: Datos de los parámetros ultrasónicos a diferentes tiempos.....	46
Cuadro 8: Características físicas y químicas del betabel al finalizar el secado sin/con pretratamiento.....	48
Cuadro 9: Valores promedio de la difusión efectiva del betabel.....	57
Cuadro 10: Difusividad efectiva a cada tiempo del secado infrarrojo sin pretratamiento. ....	58

### ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura básica general de las betalainas .....	5
Figura 2: Transferencia de masa y calor durante el secado de alimentos y los principales mecanismos de transporte .....	7
Figura 3: Curva de secado típica.....	8
Figura 4: Espectro de ondas electromagnéticas .....	10
Figura 5: Representación conceptual del secado infrarrojo.....	10
Figura 6: Representación conceptual de la extinción de la radiación (absorción, transmisión y reflexión).....	11
Figura 7: Modos de propagación de las ondas de ultrasonido. Longitudinal (arriba) y transversal (abajo) .....	18
Figura 8: Propagación de una onda ultrasónica. Parámetros característicos. ....	19
Figura 9: Clasificación de la cavitación .....	23
Figura 10: Proceso de cavitación.....	24
Figura 11: Osciloscopio .....	26
Figura 12: Representación esquemática del corte de la muestra.....	30
Figura 13: Esquema representativo del montaje del equipo.....	33
Figura 14: Zonas del baño ultrasónico a diferentes alturas.....	33

Figura 15: Acomodo de las placas de betabel	Figura 16: Secador infrarrojo	36
Figura 17: Esquema de colorimetría CIELAB		40
Figura 18: Posición adecuada en el baño ultrasónico		41
Figura 19: Amplitud emitida a diferentes tiempos		42
Figura 20: Diagrama de caja para los sólidos solubles totales		43
Figura 21: Diagrama de caja para humedad		44
Figura 22: Fotografías del cambio de color en el betabel antes del secado		45
Figura 23: Velocidad ultrasónica durante 30 min		47
Figura 24: Diagrama de caja para °Brix con/sin pretratamiento		49
Figura 25: Fotografías del cambio de color después del secado infrarrojo		50
Figura 26: Cinética de secado del betabel sin pretratamiento a 65°C		51
Figura 27: Cinética de secado del betabel sin pretratamiento a 80°C		52
Figura 28: Cinética de secado del betabel con pretratamiento de 10 min		53
Figura 29: Cinética de secado del betabel con pretratamiento de 30 min		54
Figura 30: Cinética de secado del betabel con pretratamiento a 80°C		55
Figura 31: Cinética de secado del betabel con pretratamiento de 30 min		55
Figura 32: Difusión efectiva puntual empleando el modelo de Azuara con pretratamiento		59

## RESUMEN

En este trabajo se estudiaron los cambios físicos y químicos del betabel en un proceso de secado infrarrojo con un pretratamiento de ultrasonido. El betabel empleado en este proyecto fue seleccionado a partir del diámetro como índice de cosecha. Se experimentó con placas de betabel con medidas de 2x1x1 cm, inmersas en agua destilada a temperatura ambiente para la aplicación de ultrasonido, obteniendo los valores de amplitud, periodo y frecuencia en el osciloscopio y así determinando los parámetros ultrasónicos. El pretratamiento se realizó en un baño ultrasónico a 40 KHz, eligiendo la altura adecuada para proceder a la experimentación, con base en la amplitud emitida, registrada en un osciloscopio. Se realizaron las pruebas de humedad, sólidos solubles y color, a la hortaliza en fresco y durante el secado con pretratamientos de 10 y 30 min. El secado infrarrojo se llevó a cabo a 65°C y 80°C durante 1.5 h con una velocidad de aire media de 4.93 m/s, evaluándolo en intervalos de 10 min. Para el análisis estadístico de los resultados se emplearon ANOVA de uno y dos vías, facilitando la obtención de los valores promedio de las pruebas físicas y químicas analizadas.

Se observó la disminución de los sólidos solubles, contenido de agua y color durante el pretratamiento y en el secado infrarrojo sin pretratamiento. Con los datos de humedad se realizó la cinética de secado, en la cual se pudo identificar que después de los 20 minutos se da la mayor pérdida de agua durante el pretratamiento.

La transferencia de masa fue analizada a partir del coeficiente de difusión efectiva; dicho coeficiente se obtuvo de la solución analítica a la segunda ley de Fick, considerando una placa en estado no estacionario. De lo anterior, los valores estuvieron en el orden de  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, a pesar de que se obtuvieron a diferente temperatura con/sin pretratamiento.

Tomando como referencia el modelo cinético propuesto por Azuara et al. (1992) se determinaron los valores del coeficiente de difusión efectiva a cada tiempo, observando detalladamente la pérdida de agua.

## INTRODUCCIÓN

El betabel está considerada una hortaliza de raíz, aunque en realidad es un tallo engrosado bulboso. Es un alimento nutritivo, empleado en ensaladas y jugos. El jugo tiene importantes cantidades de vitamina B, hierro, magnesio, potasio y también constituye principalmente el almacenamiento de azúcares y almidones.

El color del betabel es variable, desde violeta y rojizo hasta el marrón. La pulpa suele ser de color rojo oscuro y puede presentar en ocasiones círculos concéntricos de color blanco.

El uso de nuevas tecnologías amplía las posibilidades de innovación en el procesamiento de alimentos. En este sentido, puede conducir a una reducción del tiempo de procesamiento, a una mejora en las condiciones de funcionamiento o funcionalidad de los mismos y la necesidad de producir alimentos mínimamente procesados a la vez que seguros y que conserven sus cualidades nutricionales y organolépticas.

Actualmente el secado es un proceso de gran importancia a nivel industrial; es un fenómeno de transferencia de masa y calor donde el agua migra desde el interior del producto hacia la superficie de la cual se evapora y puede ser de alto costo. El secado infrarrojo es más ventajoso que el convectivo, en condiciones similares. La principal característica que lo distingue por sobre el resto de los procesos de deshidratación, es que no necesita un medio para la transmisión de la energía desde la fuente emisora al producto a secar, ya que es el propio producto el que absorbe la radiación. Algunas de las ventajas que tiene esta tecnología son la reducción del tiempo de secado, temperatura homogénea en el producto mientras se seca, productos terminados de mejor calidad, alto control del proceso y menor impacto medio ambiental.

Por otro lado, los pretratamientos se utilizan para reducir el contenido de agua inicial, el tiempo total del proceso o para modificar la estructura de tejido del alimento. Por tal motivo se ha aplicado el ultrasonido en un baño ultrasónico empleando como medio líquido el agua destilada, el cual provoca burbujas de cavitación, que puede mejorar la transferencia de masa en el alimento, mientras que en el sólido las ondas ultrasónicas pueden ocasionar el llamado efecto esponja, creando canales microscópicos que pueden facilitar la eliminación de agua.

Entonces, el pretratamiento ultrasónico reduce la capa límite de difusión y aumenta la transferencia de masa; se puede llevar a cabo a temperatura ambiente, no se requiere calentamiento, reduciendo la probabilidad de degradación del alimento.

La presencia de pequeñas burbujas de gas en la superficie del alimento puede disminuir la intensidad de la onda ultrasónica, que deja de propagarse a través de la muestra, esto puede ser corroborado mediante la técnica de medida de ultrasonido por transmisión para el análisis de alimentos.

Más estudios son aún necesarios para evaluar el uso del ultrasonido como pretratamiento en la industria alimentaria y solo unos pocos estudios lo han abordado en el proceso de secado infrarrojo para esta hortaliza.

# CAPITULO 1: ANTECEDENTES

## CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

### 1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL BETABEL

El betabel (*Beta vulgaris*), también llamado en algunos países remolacha, betarraga y acelga blanca, se considera descendiente de la remolacha silvestre (*Beta marítima L.*) que se encuentra actualmente en las costas del Mediterráneo, Asia Menor, el sur de Suecia y Finlandia. Es una planta perteneciente a la familia de las *Chenopodiaceae*, de la especie correspondiente al orden *Centrosperma* (Villegas, 1979), de la cual las hojas y la raíz son comestibles.

Está considerado como una hortaliza de raíz, aunque en realidad se trata de un tallo engrosado bulboso, que constituye el órgano de almacenamiento de la planta, principalmente de azúcares y almidones (Aristeo, 1998). Por sus características el betabel es considerado bianual, es decir, requiere de dos estaciones en el año para obtener tanto las semillas como las flores (Ortiz, 2007). Es una planta de climas fríos, aunque se puede explotar en climas cálidos, pero los bulbos serán de menor calidad (coloración). La temperatura ideal para el desarrollo del betabel está entre los 16 y 21°C, es sensible a pH ácidos, se desarrolla mejor en suelos neutros y alcalinos. Está clasificada como una hortaliza altamente tolerante a la salinidad. En cuanto a la textura se desarrolla mejor en suelos ligeros (arenosos) debido a que en suelos arcillosos se deforma la parte comestible (Aristeo, 1998).

En México puede explotarse durante todo el año, en la cosecha alcanza un diámetro de entre 8 a 10 cm (SAGARPA, 2014), se produce fundamentalmente para el consumo en fresco: jugo, pelado y rallado para una ensalada o directamente en forma de virutas como sustituto de aperitivos tradicionales, que son ricos en ácidos grasos trans (Aro et al. , 1998); principalmente se utiliza en la industria alimenticia como colorante natural.

Las antiguas civilizaciones como la romana, egipcia e hindú utilizaban sus hojas como alimento y la raíz carnosa como medicamento para tratar dolores de muelas. El tamaño del betabel determina si se le debe cocinar, los pequeños que tienen menos de 4 cm de diámetro son excelentes para servirse crudos; los de tamaño mediano y grande son buenos para cocinar, los muy grandes son demasiado duros y leñosos para comer. Es recomendable conservar su color y nutrientes cociéndolos en agua, debido a que si se cortan y pelan, escurrirá el pigmento rojo que contiene, llamado betacianina y se convertirá en color marrón mate.

Tiene una gama inmensa de presentaciones: al vapor, caliente con mantequilla, en vinagre, frío como condimento. El betabel encurtido es un alimento tradicional de América del Sur. También es común en Australia y Nueva Zelanda para hamburguesas. Una preparación cada vez más popular, consiste en freír el betabel pelado y cortado en cubos para hornearlos hasta que estén tiernos. Puede ser consumido como un componente de comida instantánea (Krejцова, Cernohorsky, & Meixner, 2007). También es empleado para el proceso de vino tinto al estilo de Borgoña (Manivannan & Rajasimman, 2008).

Al igual que otras hortalizas, proporciona nutrientes esenciales para el organismo. Por lo tanto, la ingestión de betabel puede ser considerada un factor en la prevención del cáncer por su contenido en flavonoides. Su mayor importancia desde el punto de vista alimenticio se debe a su alto contenido de hierro y fósforo, siendo mucho menor en los restantes elementos, tanto minerales como vitaminas.

Los beneficios que ofrece son:

- ✓ Purifica la sangre.
- ✓ Alto contenido en vitaminas y hierro que evita la aparición de la anemia por la deficiencia de hierro.
- ✓ Estimula la circulación sanguínea.
- ✓ Ayuda a la regeneración de glóbulos rojos.
- ✓ El jugo posee propiedades curativas contra el dolor de cabeza y dolores menstruales.
- ✓ De la misma manera es práctico para regularizar la menstruación y la menopausia prematura.
- ✓ Elimina las toxinas y estimula las funciones cerebrales por lo que ayuda a mantener una buena salud mental y prevenir el envejecimiento precoz.
- ✓ Alto contenido en carbohidratos lo que lo convierte en un alimento energético.
- ✓ Favorece el funcionamiento de los riñones y evita la formación de cálculos renales.
- ✓ Beber el jugo de betabel es un limpiador estomacal muy fuerte, puede causar molestias y náuseas. Es recomendable mezclarlo con jugo de zanahoria o algún otro jugo de fruta u hortaliza.

El betabel tiene compuestos valiosos como: carotenoides, glicina betaína, saponinas, betacianinas, folatos, betanina, polifenoles y flavonoides. Por su composición (Cuadro 1), es una de las hortalizas

con mayor contenido de azúcar y cada 100 gramos de betabel poseen el equivalente a 5 gramos de azúcar; su valor alimenticio se debe a que contiene un 9.56% de carbohidratos, está entre el más dulce de las hortalizas, contiene más azúcar que las zanahorias y el maíz dulce (Manivannan & Rajasimman, 2008). También contiene pequeñas cantidades de proteínas, grasas y alto contenido de fibra, soluble e insoluble. La fibra insoluble ayuda a mantener el tracto intestinal trabajando bien, mientras que la fibra soluble mantiene los niveles de azúcar en la sangre y colesterol controlado (Yanchapanta, 2011).

Cuadro 1: Información Nutricional del Betabel

<b>Contenido Nutricional del Betabel (Por cada 100 g)</b>	
Agua	87.5 g
Energía	43 kcal
Grasa	0.17 g
Proteína	1.61 g
Carbohidratos	9.56 g
Fibra	2.8 g
Potasio	325 mg
Sodio	78 mg
Fósforo	40 mg
Calcio	16 mg
Magnesio	23 mg
Hierro	0.80 mg
Zinc	0.35 mg
Vitamina C	4.9 mg
Vitamina B2	0.040 mg
Vitamina B6	0.067 mg
Vitamina A	36 IU
Vitamina E	0.300 mg
Folacina	109 mcg
Niacina	0.334 mg

(Ortiz, 2007)

## 1.2 COLORANTES NATURALES DEL BETABEL

Los seres humanos fueron reconociendo y utilizando el color que en la naturaleza existía y gradualmente fueron desarrollando y perfeccionando métodos de extracción para compuestos de origen vegetal. Los colorantes están presentes en casi todas las plantas y producidos directamente por su actividad fisiológica, suelen estar disueltos o formando depósitos granulares en las células superficiales y se encuentran concentrados en las vacuolas celulares. Los colorantes naturales son aquellos que se obtienen de la materia vegetal sin proceso químico.

Los pigmentos presentes en el betabel, son las betalaínas, que le confieren su color rojo característico. Las betalaínas son menos conocidas que las antocianinas y carotenoides, probablemente por su relativa escasez natural. Sin embargo, constituyen indudablemente una opción interesante dado su gama de colores y exhiben una fuerza tintorial tres veces mayor que las antocianinas, al igual que su actividad antioxidante elevada y una capacidad de captación de radicales libres, por lo que se busca incluirlos en alimentos ya que el color y la apariencia superficial son considerados un importante atributo en un alimento, aumentando su atractivo o más aun, vinculándolo con su calidad, debido a que son los primeros parámetros evaluados por los consumidores. Yam & Papadakis (2004) presentaron un método simple de imágenes digitales para medir y analizar el color de la superficie de los alimentos, cualitativamente y cuantitativamente.

Las betalaínas (Figura 1) no pertenecen a los alcaloides porque son de naturaleza ácida debido a la presencia de varios grupos carboxilo; son pigmentos solubles en agua y existen como sales en las vacuolas de las células vegetales (Sánchez, 2006). Según su estructura química, estos pigmentos pueden ser divididos en betacianinas (rojo-violeta) o betaxantinas (amarillo); las betacianinas se consideran glucósidos y a diferencia de las betaxantinas son compuestos que presentan resonancia debido a sus sistemas saturados. Las betacianinas han adquirido importancia a través del tiempo ya que resultan una fuente natural del color capaz de sustituir a los tintes rojo sintéticos (Pino, Cerezal, & Salabarría, 1994). Estos pigmentos por su baja toxicidad pueden ser utilizados para el consumo humano en diversos productos: gelatina, leche fermentada, yoghurt, bebidas en polvo, panadería, productos farmacéuticos (López, 1992), en los que el pigmento se conserva más fácilmente. Las plantas que contienen estos pigmentos se limitan a diez familias del orden *Centrospermaes*. Las más estudiadas son las del betabel, que se localizan en las vacuolas y cuya betacianina principal recibe el nombre de betanina, debido a la hidrólisis. La

betanina es el pigmento mayoritario, contribuyendo del 75-95% del color rojo contenido en el betabel (Pennet, 1991) y algunas variedades contienen hasta 200 mg/100 g de peso fresco de betacianinas que representan hasta un 2% de los sólidos solubles.

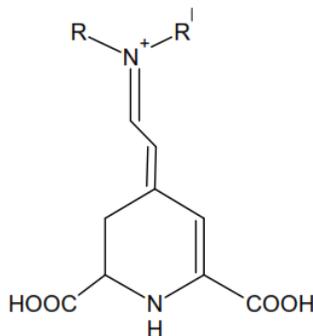


Figura 1: Estructura básica general de las betalainas (Franco, 2004).

La concentración del pigmento en el betabel es aproximadamente del 1% (Fennema, 1993), fue descrita primero como “betaciana” y aislada del betabel en 1918. Puede transformarse y perder su coloración bajo la influencia de factores como el pH, las temperaturas altas, oxígeno, luz, humedad del alimento, actividad de agua, azúcares y ácido ascórbico. Al calentar la betanina a altas temperaturas (>60°C) y por tiempos prolongados (>1h), se acelera la hidrólisis de este compuesto en solución, produciendo ácido betalámico (Sánchez, 2006).

En general, su estabilidad está fuertemente influenciada por las enzimas endógenas presentes en su estructura, que de no ser inactivadas, principalmente por escaldado, pueden degradar a las betalainas y a su vez el color, ya que se genera el pardeamiento enzimático (Latorre et al., 2010).

Sivakumar et al. (2009, 2011) estudiaron la extracción de colorantes de plantas tales como betabel, flores de caléndula, cáscaras de granada y reportaron una mejoría significativa debido al uso del ultrasonido para la aplicación industrial. John & Stuart (1990) sometieron a ultrasonido células de betabel en suspensión durante 10 s y 60 s, logrando una liberación de pigmento al medio circundante en un tiempo de 60 s sin ningún daño estructural para subcultivarlas y obtener un pigmento competente. Azuola & Vargas (2007) realizaron un estudio bibliográfico de las publicaciones sobre diferentes métodos de extracción y su comparación a las extracciones asistidas por ultrasonido (EAU), con el fin de evaluar su viabilidad industrial, encontrando que la EAU es más eficiente que los métodos de extracción tradicionales, económica y sencilla.

### 1.3 SECADO CONVECTIVO

El secado o desorción es uno de los procesos de conservación más antiguos y comunes, ocupando un importante lugar en la transformación de alimentos. Ocurre cuando se pone en contacto un sólido húmedo que tiene un compuesto volátil (por lo general agua), con una fase gaseosa relativamente seca (aire), donde parte del agua abandona el sólido transfiriéndose a la fase gaseosa. En esta operación además de agua, se pueden perder otros componentes (Cruz, 2008). La disminución del contenido de humedad en los alimentos reduce la susceptibilidad al deterioro de los mismos, convirtiéndolos en productos más estables y poder alargar su vida útil para su posterior utilización.

Además de los fines de la conservación, la deshidratación se realiza para disminuir el peso y el volumen de los alimentos, lo cual resulta evidentemente en el ahorro del costo del transporte y de los empaques. En el caso de las hortalizas deshidratadas y principalmente el betabel, la importancia de conservarlo es debido a que se puede contar con la hortaliza en épocas que normalmente no se producen, logrando así mejores precios.

Entonces el secado es una operación unitaria en la que se da el transporte simultáneo de calor y masa (Fito, Andrés, Barat, & Albors, 2001) donde se da la transferencia de energía (energía calórica) desde el medio circundante para evaporar la humedad de la superficie y la transferencia de humedad interna hacia la superficie del sólido y su evaporación posterior. La transferencia de energía puede ocurrir por convección, conducción o radiación, o en algunos casos por una combinación de ellos (Mujumdar, 2006).

Como ya se ha mencionado, durante el secado convectivo tienen lugar dos procesos simultáneamente, una transferencia de calor hacia el sólido y una transferencia de masa (agua) desde el sólido al fluido secante (Figura 2).

La transferencia de calor desde el aire hacia el sólido ocurre por convección, suministrando calor a la superficie del sólido que se está secando, de forma tal que el calor luego se difunde dentro del sólido esencialmente por conducción.

La evaporación es controlada por la difusión de vapor desde la superficie del sólido hacia el aire que lo circunda. El contacto entre el aire y el agua líquida proveniente de la matriz sólida involucra

fenómenos de transporte interfacial, donde tienen especial consideración las características higroscópicas del material y los coeficientes de transferencia por convección (Váquiro, 2009).

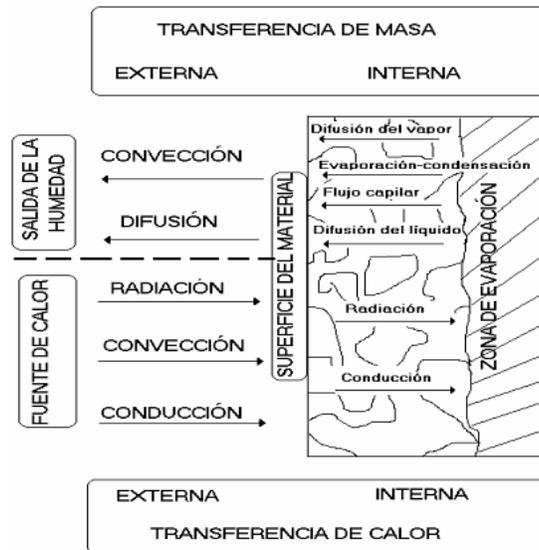


Figura 2: Transferencia de masa y calor durante el secado de alimentos y los principales mecanismos de transporte (Fito et al., 2001).

El mecanismo que regula el secado de un producto depende de la estructura de éste y de los parámetros de secado como el contenido de humedad, dimensiones del alimento, temperatura del medio de calentamiento y contenido de humedad en equilibrio.

Todos los alimentos sólidos presentan cierto contenido de humedad en equilibrio cuando se ponen en contacto con el aire y a una temperatura particular. En consecuencia, el alimento tiende a perder o ganar humedad durante un periodo para que alcancen este valor. Si la temperatura o la humedad del aire cambian, entonces se pierde o gana humedad hasta que se alcanza un nuevo valor. Las curvas de humedad de equilibrio dependen de la temperatura ambiental para un alimento particular y de su estructura fibrosa. La humedad de un alimento sólido es retenida de dos formas, la llamada agua “ligada” y agua libre. El agua ligada ejerce una presión de vapor menor que la del agua libre a la misma temperatura. La humedad en forma de agua ligada podría ser retenida en capilares finos, adsorbida sobre la superficie, dentro de una célula o paredes fibrosas y en combinación física/química con el sólido. Por otra parte, el agua libre ejerce una presión de vapor igual a la del agua pura a la misma temperatura. La humedad en forma de agua libre podría estar retenida en los espacios vacíos de los alimentos sólidos.

De esta manera, el secado convectivo de productos alimentarios presenta un comportamiento típico caracterizado por la pérdida de humedad en función del tiempo (Figura 3). Estas representaciones son denominadas curvas de secado, permitiendo distinguir los periodos de secado predominantes. La clasificación se realiza en función del contenido de humedad del alimento ( $X_w$ ) frente al tiempo transcurrido desde que se inicia la operación de secado ( $t$ ), y se pueden distinguir tres periodos.

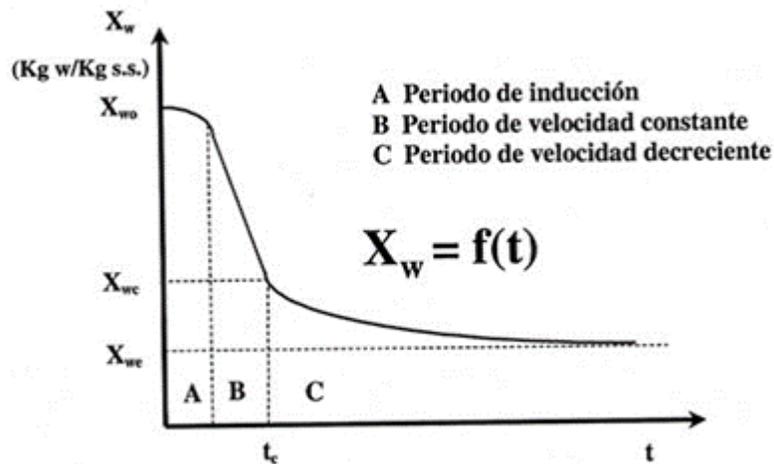


Figura 3: Curva de secado típica (Xue, 2004).

- A. Periodo de Inducción: En esta etapa se inicia el proceso de secado de manera que el producto se calienta y aumenta la temperatura de la interfase, produciéndose una adaptación del material a las condiciones de secado. La duración de este periodo es función del contenido inicial de humedad del sólido, de su temperatura y de la velocidad del aire.
- B. Periodo de Velocidad Constante: La velocidad con que se elimina agua de la superficie del sólido es igual que la velocidad con que llega a ella desde el interior del mismo. De esta manera, la superficie del material se mantiene saturada y se comporta como una masa de líquido. De aquí que la velocidad de secado sea igual a la velocidad de evaporación del agua, que será a su vez proporcional a la velocidad de flujo de calor que llega desde el aire al sólido. En tales condiciones, la temperatura de la interfase (sólido-aire) permanece constante y el calor que llega al sólido se invierte totalmente en evaporar el líquido.
- C. Periodo Decreciente: La humedad del producto sigue disminuyendo hasta alcanzar la humedad de equilibrio. En este periodo la velocidad del proceso depende principalmente de la estructura interna del sólido y de los mecanismos de migración de humedad.

A pesar de ser un método ampliamente utilizado, todavía presenta algunas limitaciones que afectan a la calidad de los productos, genera mayor consumo de energía y, por ende, un impacto ambiental considerable. El deterioro de la calidad corresponde con cambios en las propiedades bioquímicas de los productos secos, provocando el deterioro de los compuestos aromáticos (Timoumi, Mihoubi, & Zagrouba, 2007), la degradación de las sustancias nutritivas (Santos & Silva, 2009), reacción de pardeamiento y pérdida de color (Suvarnakuta, Devahastin, & Mujumdar, 2005), entre otras.

### **1.3.1 NUEVAS TECNOLOGÍAS APLICADAS AL SECADO CONVECTIVO.**

El secado convectivo presenta actualmente algunas limitaciones, que la comunidad científica debe considerar como retos u oportunidades de cara a mejorar el proceso. Entre estas limitaciones, se encuentran principalmente, la baja velocidad del proceso y la pérdida de calidad del producto durante el secado. El encogimiento, formación de costra y la deformación del material, son algunas de las deficiencias más evidentes que se encuentran en los productos secos y que son derivadas de su procesado (Lewicki, 2006).

Los nuevos desarrollos y las tecnologías emergentes se pueden clasificar en las siguientes categorías: aquellas que pretenden mejorar tecnologías ya existentes y aquellas relacionadas con el desarrollo de tecnologías de secado rentables (Mujumdar, 2007).

La aplicación de nuevas tecnologías como fuentes de energía adicionales durante el secado convectivo podría suponer la resolución de algunas de sus limitaciones. La combinación de tecnologías debe evaluarse no sólo teniendo en cuenta la influencia en las principales variables del proceso, sino también en la calidad del producto (Chou & Chua, 2001). Algunas de las principales tecnologías aplicadas son la radiación infrarroja y el ultrasonido de potencia como pretratamiento.

### **1.3.2 SECADO INFRARROJO**

Uno de los métodos cada vez más populares, pero aun no común, es aquel que suministra calor al producto para deshidratarlo por medio de radiación infrarroja (IR), también llamado secado por radiación térmica, en donde el calor se transfiere al alimento a secar en forma de energía radiante.

La radiación infrarroja corresponde a la parte del espectro electromagnético que es responsable del efecto del calentamiento del sol como se muestra en la figura 4, cuya longitud de onda es más larga que la de la luz visible pero más corta que la de las microondas. El secado por radiación artificial implica el uso de lámparas eléctricas especiales y paneles cerámicos o metálicos calentados por electricidad o gas y por lo general se clasifica en tres regiones llamadas: cercana o near (NIR), media o mid (MIR) y lejana o far (FIR), cuyas longitudes de onda se encuentran entre 0.75-1.4 $\mu\text{m}$ , 1.4-3 $\mu\text{m}$  y 3-1000 $\mu\text{m}$ , respectivamente. En alimentos, la aplicación intermitente del IR evita muchos problemas de deterioro de la calidad del producto. El IR se propaga esencialmente como luz visible.

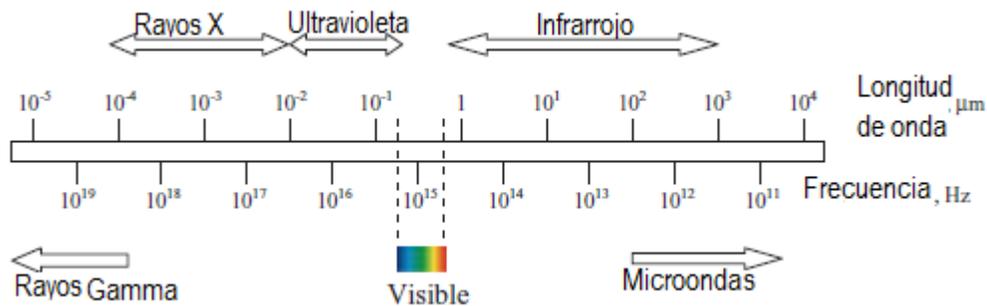


Figura 4: Espectro de ondas electromagnéticas (Modest, 1993).

La principal característica que distingue al secado IR (Figura 5) por sobre el resto de los procesos de secado, es que es innecesario un medio para la transmisión de la energía desde la fuente emisora al alimento a secar; ya que es el propio alimento el que absorbe la radiación IR (Nindo & Mwithiga, 2011).

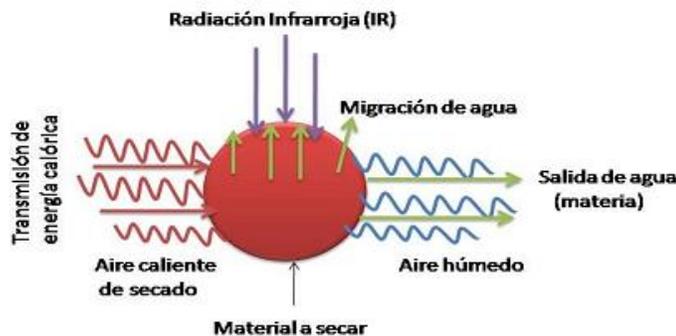


Figura 5: Representación conceptual del secado infrarrojo (Espinoza, 2011).

Con respecto a los alimentos, se sabe que están compuestos principalmente de humedad, proteína, carbohidratos y grasas, cuyas propiedades fisicoquímicas y la estructura se clasifican como sistemas coloidales de tipo capilar-poroso. Cuando la radiación IR incide en la superficie de un alimento y la radiación penetra, el aumento en la vibración molecular debido a la absorción de radiación genera calor en la superficie del alimento y en las capas internas en forma simultánea, puede provocar cambios en los estados electrónicos, vibracionales, rotacionales de átomos y moléculas (Atungulu & Pan, 2011). La absorción de la radiación en alimentos depende principalmente del contenido de agua, espesor y su naturaleza fisicoquímica. Los enlaces OH del agua absorben la energía IR y comienzan a alternarse con la misma frecuencia que la radiación incidente. Esta transformación de la radiación IR a la energía rotacional provoca la evaporación del agua. Cuando el IR golpea una superficie, parte de ella se puede reflejar ( $\rho$ ), absorber ( $\alpha$ ) o transmitir ( $\tau$ ), como se observa en la figura 6.

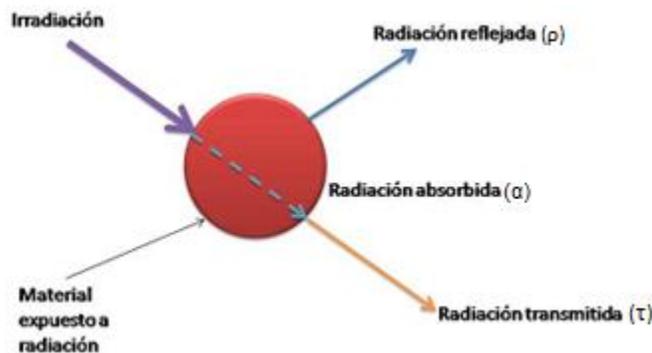


Figura 6: Representación conceptual de la extinción de la radiación (absorción, transmisión y reflexión) (Espinoza, 2011).

En general, los alimentos absorben radiación infrarroja lejana (FIR) más eficientemente a través de los mecanismos de cambio en el estado vibracional de las moléculas, lo que puede llevar a un calentamiento por radiación. La humedad, proteínas y almidones absorben la energía FIR.

A pesar de que el secado infrarrojo de materiales porosos de gran espesor no ha sido desarrollado totalmente, Mujumdar (2006) indica que esta tecnología puede ser aplicada en la deshidratación de alimentos. Se espera que la aplicación de infrarrojo en la industria alimentaria, represente un nuevo proceso para la elaboración de productos deshidratados de alta calidad a bajo costo.

Algunas de las ventajas que tiene esta tecnología radican en la versatilidad del calentamiento, simplicidad del equipo requerido, fácil calentamiento convectivo, temperatura homogénea durante el proceso, reducción del tiempo de secado, menor impacto medio ambiental, ahorro en espacio y energía (Krishnamurthy et al., 2011). El equipo puede ser compacto y automatizado con un alto grado de control sobre los parámetros del proceso (Nowak & Lewicki, 2004).

Respecto a la calidad final del producto, existen evidencias que demuestran que parámetros como color, textura y composición química en alimentos no sufren modificaciones significativas durante el secado infrarrojo. Tuncel et al.,(2010) demostraron que el secado infrarrojo en el maíz, no tuvo ningún impacto en el contenido de color, carotenoides o presencia de ácido fenólico. Por otra parte, Boudhrioua et al. (2008) obtuvieron resultados que indican una conservación y/o mejora en el color verde de hojas de oliva deshidratadas con esta operación. Shi et al. (2008) concluyeron que aplicando secado infrarrojo se obtenían arándanos mucho más firmes en comparación a los obtenidos con un secado convencional.

Autores como Hebbar, Vishwanatha, & Ramesh (2004), demuestra que aplicando secado infrarrojo se obtienen mayores tasas de transferencia de masa, reducción de tiempos de secado en forma drástica (48%) en comparación al secado convencional. Kumar, Hebbar, Sukumar, & Ramesh (2005) aplicaron el secado infrarrojo en rodajas de cebolla y demuestran que existe una variación considerable en el color y en el porcentaje de ácido pirúvico en el producto deshidratado, estas variaciones son aún mayores en el secado convectivo.

Además, persiguiendo el objetivo de mejorar los parámetros de calidad de los productos deshidratados, la utilización de pretratamientos constituye una alternativa interesante para aumentar la velocidad del proceso (Walde et al., 2006).

#### **1.4 TRANSFERENCIA DE MASA**

Teniendo en cuenta que el alimento sometido a deshidratación es en general un sistema trifásico (matriz sólido-MS, fracción líquida-FL y fracción gaseosa o porosa-FG) pueden distinguirse varios mecanismos de transporte de materia según la fase a través de la cual se produce el transporte y según se trate de agua líquida, agua líquida más solutos o vapor de agua, como se observa en el cuadro 2. Por otro lado, en el seno del aire de secado también tiene lugar transporte de agua en forma de vapor por mecanismo turbulento.

Cuadro 2: Fenómenos de transferencia de masa

<b>MS=</b>	Agua líquida: adsorción/desorción Agua líquida y solutos: Difusión Fickiana asociada con transiciones de fase y mecanismos deformación-relajación.
<b>FL=</b>	Agua líquida y solutos: Mecanismo Hidrodinámico (HDM)/Capilaridad Agua líquida y solutos: Pseudodifusión fickiana. Agua: Osmótica Agua y solutos: Fickiana
<b>FG=</b>	Agua vapor: Vaporización-Condensación Agua vapor: Difusión Fickiana
<b>Aire exterior=</b>	Agua vapor: Turbulento

Fuente: Fito et al., 2001

El transporte de humedad desde el interior hacia la superficie del sólido se desarrolla fundamentalmente a través de uno o varios de los siguientes mecanismos: difusión líquida (si el líquido se evapora en la superficie del material), difusión de vapor (si el líquido se evapora dentro del material) y diferencias de presión hidrostática (por tensión interna debido al encogimiento del material). Los mecanismos de transferencia de humedad interna pueden variar durante el secado ya que son función de la estructura física, temperatura y humedad del material (García, 2007).

Generalmente, en un proceso de transferencia de materia no se da únicamente uno de estos mecanismos. El flujo total es consecuencia de la combinación de los diferentes mecanismos. Además, el mecanismo controlante puede variar a lo largo de un proceso. Sin embargo, los más importantes son (Fito et al., 2001):

- Difusión de agua en forma de vapor o en fase líquida
- Capilaridad

La cinética de secado constituye una herramienta básica en los nuevos sistemas de producción ya que permite estimar previamente cual va a ser el desarrollo del proceso. Debido a ello la modelización es una vía de representación de procesos o fenómenos para explicar los datos observados y predecir el comportamiento del producto sobre diferentes condiciones.

El conjunto de consideraciones asumidas en la formulación del modelo matemático determinan el grado de complejidad requerido para su resolución. Adicionalmente, dependiendo del tipo de modelo que se vaya a emplear (empírico y/o teórico) para la representación del secado convectivo.

Dada la complejidad de la modelización de los fenómenos de transporte en el proceso de secado, se hace uso de los modelos empíricos, los cuales establecen una directa relación entre el contenido medio de humedad del producto y el tiempo de secado.

Uno de los modelos cinéticos ajustado a la Ley de Fick con el fin de obtener el coeficiente de difusión en cada tiempo, es el propuesto por Azuara et al. (1992) para la deshidratación osmótica, descrito por la Ec. 1, en la que  $WL_{\infty}$  es la pérdida de agua en el equilibrio;  $S_1$  es una constante de velocidad relativa para la pérdida de agua y  $WL$  es la pérdida de agua a un determinado tiempo,  $t$ .

$$\frac{t}{WL} = \frac{1}{S_1 WL_{\infty}} + \frac{t}{WL_{\infty}} \quad (1)$$

Este modelo requiere el ajuste de dos parámetros y está basado en el balance de masa para predecir la cinética y, además, determinar el punto de equilibrio final. Tiene la desventaja de limitar su validez solo a nivel experimental para el que se obtienen los parámetros.

Los modelos difusionales son fáciles de formular y normalmente proporcionan resultados razonables. La formulación y complejidad de la resolución del modelo depende de las suposiciones que se tienen en cuenta. Generalmente, se asume una difusividad efectiva que incluye todos los efectos relacionados con la cinética, tanto los conocidos como los fenómenos desconocidos (García, 2007).

Al considerar que el fenómeno difusivo es predominante en la transferencia de masa durante el secado y que el comportamiento del producto durante el proceso puede ser descrito adecuadamente mediante la aplicación de la ley particular de Fick, entonces, a partir de la solución de la segunda ley de Fick considerando que la difusión se efectúa de forma unidireccional y en estado transiente, entonces puede describirse matemáticamente como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

En la ecuación 2, tanto el flujo como la concentración (C) varían con el tiempo (t) y el coeficiente de difusión (D) no depende de la concentración, y por tanto tampoco de la posición. La solución a esta ecuación diferencial se ha obtenido suponiendo que el material es homogéneo e isotrópico y que la difusividad es constante. También se ha dado solución para la difusión de humedad en distintas geometrías, como una placa infinita en estado no estacionario y de esta obtenemos la ecuación 3 para la transferencia de agua.

$$M_r = \frac{(m_t - m_\infty)}{(m_0 - m_\infty)} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(2n+1)^2} \right] \exp \left[ - \left( n + \frac{1}{2} \right)^2 \pi^2 \frac{D_{ew} t}{L^2} \right] \quad (3)$$

Donde  $M_r$  es la proporción de humedad;  $m$  es el contenido de humedad; los subíndices 0,  $\infty$  y  $t$  representan la concentración inicial, en el equilibrio y en cualquier tiempo, respectivamente;  $D_{ew}$  es el coeficiente de difusión efectiva;  $t$  es el tiempo y  $L$  es el espesor de la placa infinita (Rastogi et al. 2002).

## 1.5 ULTRASONIDO

El siglo XXI ha traído consigo importantes avances científicos y tecnológicos que han impactado profundamente a la sociedad actual. El efecto marcado de la globalización, los acelerados ritmos de trabajo, así como el acceso ilimitado y casi instantáneo a la información (Azuola & Vargas, 2007), ha provocado que la industria de productos alimenticios sea un sector altamente dinámico y competitivo. Para tener éxito, deben seguir proporcionando alimentos seguros, nutritivos y deseables, así como ser capaces de responder rápidamente a los cambios en la preferencia de los consumidores de más barato, más saludable y más conveniente (McClements D., 1997). Para ello deben buscar productos de alta calidad que conserven las características naturales (se consumen crudos o con un tratamiento térmico suave), mejorar la calidad de los productos existentes, desarrollar nuevos productos, reducir los residuos y los costos de elaboración.

En este sentido, el desafío actual es combinarla con la conservación térmica simultáneamente. Entre las tecnologías con potencial aplicación, ha surgido el ultrasonido, aplicado como una técnica de diagnóstico para controlar y mejorar los procesos de alimentos al afectar la cinética, el rendimiento y los fenómenos de transporte, como la transferencia de masa.

El proceso de alimentos es una ciencia que combina los fundamentos de la física, química, biología y la microbiología. Por siglos, la aplicación de tratamientos térmicos ha sido la tecnología más comúnmente utilizada para la estabilización de alimentos debido a su alta capacidad de destrucción de microorganismos e inactivación de enzimas. Sin embargo, se sabe que el calor puede no solamente perjudicar las propiedades organolépticas del alimento sino también, reducir los contenidos y/o la biodisponibilidad de algunos nutrientes (Gonzalez, 2005).

Recientemente el ultrasonido se ha usado como un intensificador de proceso para diversas operaciones unitarias, esencialmente para mejorar la difusión a través de la matriz. En el caso de la extracción de colorantes naturales, el ultrasonido se utiliza como una herramienta para mejorar la transferencia de masa por las fuerzas de cavitación, causando la ruptura del tejido de la planta y mejorar la liberación de sustancias intracelulares de la materia vegetal natural y el transporte hasta el medio disolvente. Por lo tanto, el ultrasonido podría ser beneficioso para la extracción de colorantes naturales (Sivakumar, Vijaeeswarri, & Lakshmi, 2011).

Según la frecuencia, los ultrasonidos pueden clasificarse en ultrasonidos de baja intensidad (intensidad  $< 1 \text{ W/cm}^2$  y frecuencia 0.1-10 MHz) o de alta intensidad (intensidad 10-1000  $\text{W/cm}^2$  y frecuencia  $< 0.1 \text{ MHz}$ ), también conocidos como ultrasonidos de potencia.

La eficacia del ultrasonido como instrumento de transformación de los alimentos se ha demostrado en el laboratorio. En la mayoría de los casos, la frecuencia utilizada ha sido la que está disponible comercialmente, es decir, 20-42 kHz, y esto ha demostrado ser satisfactorio. El uso de la tecnología de ultrasonidos que se conoce como “ultrasonido de potencia” o de “alta intensidad”, se basa en el funcionamiento adecuado de una serie de mecanismos activados por la energía ultrasónica, tales como el calor, agitación, difusión, inestabilidad de la interfaz, fricción, rotura mecánica, efectos químicos, etc., y tiene como objetivo principal inducir cambios en las propiedades de la onda (velocidad, atenuación, espectro de frecuencia etc.) cuando se viaja a través de un medio que puede afectar a los productos y procesos.

En general, la producción de ultrasonidos consiste en la conversión de cualquier otro tipo de energía en energía acústica (Carlin, 1972) y se requiere un sistema capaz de generar un campo estable y fiable. Los dos componentes esenciales en un sistema ultrasónico son una fuente de energía (eléctrica, magnética o mecánica) y un transductor. El transductor es el dispositivo encargado de transformar la energía proporcionada por la fuente en energía acústica con las características de intensidad y frecuencia deseadas (García, 2007). Si la frecuencia de esta señal es mayor de 20 kHz se generarán ondas ultrasónicas y, por lo tanto, es un transductor ultrasónico (Carrero, 2010).

Actualmente la mayoría de los transductores ultrasónicos son piezoeléctricos. El fundamento de estos transductores se basa en el efecto piezoeléctrico y tienen cerca del 95% de eficiencia (Cárcel et al., 2012), es probablemente la razón principal por la que es más ampliamente utilizado, independientemente de los niveles relativamente bajos de intensidad y el corto tiempo de vida.

La energía acústica del ultrasonido de potencia son una serie de efectos que pueden ser responsables de la aceleración del proceso de secado. A diferencia de otras tecnologías como radiofrecuencia o radiación infrarroja, el ultrasonido de potencia no produce un calentamiento significativo del material. El bajo efecto térmico del ultrasonido podría favorecer su aplicación en el secado de materiales sensibles al calor.

En los últimos años la tecnología de ultrasonido se ha considerado como una herramienta valiosa en los procesos de ingeniería en alimentos.

La fuente que produce la onda ultrasónica suele ser un cuerpo vibrante. El movimiento de vibración de dicho cuerpo se comunica a las partículas del medio que le rodean, las cuales comienzan a oscilar, comunicando la energía de forma también oscilante a las partículas vecinas (Mason & Lorimer, 2002), es decir, que la onda ultrasónica tiene distintos modos de propagación, caracterizados por la dirección del desplazamiento de la onda y la dirección del movimiento de las partículas y se pueden clasificar en tres tipos: longitudinales, transversales (Figura 7) y de superficie, siendo los más empleados en el análisis de alimentos los modos longitudinal y transversal. No obstante, en algunas aplicaciones puede ser de utilidad emplear ondas de ultrasonido que se propaguen de otro modo, como las ondas superficiales o de Rayleigh.

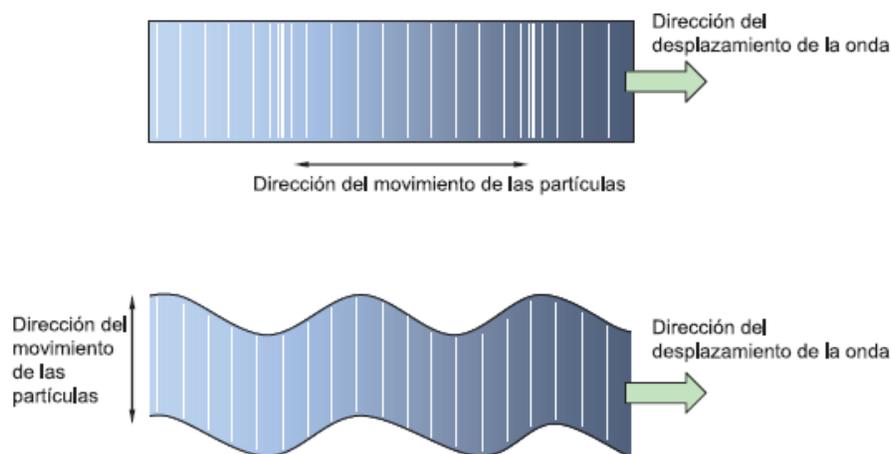


Figura 7: Modos de propagación de las ondas de ultrasonido. Longitudinal (arriba) y transversal (abajo) (García-Alvarez, et al., 2010).

En el modo longitudinal, el desplazamiento de partículas se produce paralelo a la propagación de la onda (Recuero, 1995), mientras que en el modo transversal el desplazamiento de partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Las longitudinales pueden representarse, de igual manera que las ondas transversales, con una zona de máxima presión y densidad, denominada compresión o cresta y otra de mínima presión y densidad. Las ondas transversales no viajan en líquidos o gases dado que estos medios no tienen suficiente elasticidad para su propagación (Benedito, 1998), por lo que solo aparecen en sólidos (Cárcel, 2003). Las ondas superficiales viajan dentro de una distancia muy corta de la superficie y son similares a las que se producen en el agua al lanzar una piedra.

### 1.5.1 PARÁMETROS ULTRASONICOS

Al igual que cualquier tipo de onda, las ondas ultrasónicas se caracterizan por una serie de parámetros como la frecuencia o número de repeticiones de la onda por segundo ( $f$ ), la amplitud ( $A$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ), como se observa en la Figura 8. También son parámetros de interés la velocidad ( $c$ ) y la atenuación ( $\alpha$ ) de la onda cuando se propaga por un determinado medio, ya que son características acústicas propias de cada material relacionadas con propiedades físicas (García-Álvarez et al., 2010). Asimismo, existen otros parámetros acústicos de utilidad como la impedancia acústica ( $Z$ ), ya que este parámetro está relacionado con la resistencia al paso de una onda, que dependen de las discontinuidades del material examinado.

Con el fin de controlar un proceso, es necesario conocer los parámetros principales (Figura 8).

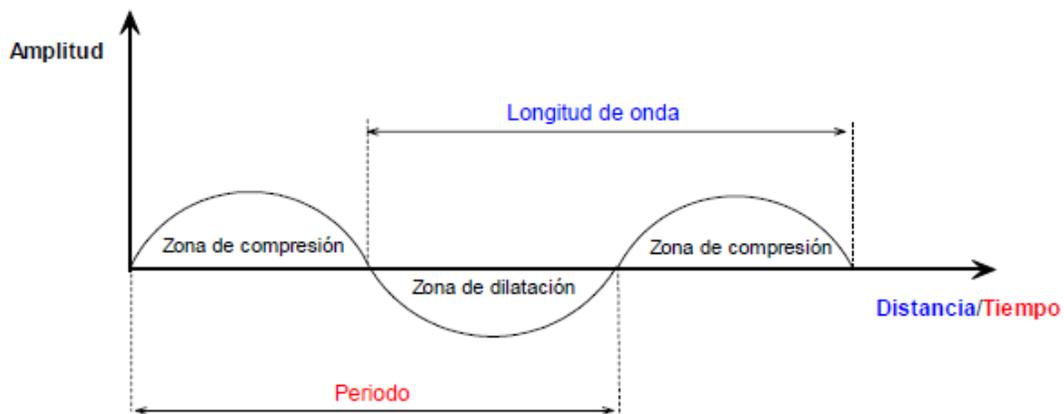


Figura 8: Propagación de una onda ultrasónica. Parámetros característicos (García, 2007).

#### a) Frecuencia

La frecuencia de una onda se define como el número de vibraciones o ciclos completados por la onda en una unidad de tiempo. La unidad utilizada en el Sistema Internacional es el Hertz (Hz), que se define como el número de ciclos completados por una onda en un segundo. Al inverso de la frecuencia se le denomina periodo (T), parte inferior de la figura 8 y se define como el tiempo necesario para que la onda realice un ciclo.

#### b) Amplitud

La amplitud de onda es el máximo desplazamiento de la partícula desde la posición inicial de reposo o equilibrio, expresada en volts (V). Está representada en el eje de las ordenada (Figura 8).

#### c) Intensidad acústica

La intensidad de una onda acústica (I), es la energía media transmitida a través de la unidad de área perpendicular a la dirección de propagación de la onda por unidad de tiempo ( $W/m^2$ ). (Mason & Lorimer, 2002).

#### d) Longitud de onda

Distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de vibración, o lo que es igual, la distancia entre dos puntos consecutivos que vibran en fase,

expresada en metros (García, 2007). La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, parte superior de la figura 8. El período y la longitud de onda están relacionados, pues el periodo es el tiempo que toma una partícula en recorrer una longitud de onda (SISTENDCA, 2010).

#### **e) Velocidad**

La velocidad es la propagación de la onda en un medio en una unidad de tiempo (m/s). La velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales es característica del material, aunque puede verse afectada por variables ambientales como la temperatura.

#### **f) Presión acústica**

Presión existente en las diversas zonas del material. Esta presión será mayor que la normal en las zonas de contracción de partículas y menor en las zonas dilatadas, por lo que la presión acústica ( $P_A$ ) es alterna. La desviación máxima en relación a la normal se denomina amplitud de la presión acústica y está relacionada con la amplitud de oscilación de la onda ( $N/m^2$ ).

#### **g) Potencia acústica**

La potencia acústica ( $P$ ) es la energía total irradiada por la fuente ultrasónica por unidad de tiempo. Se puede calcular a partir de la intensidad acústica y del área de la superficie radiante. Expresándose en notación decibélica a partir de la relación logarítmica entre la intensidad (o potencia) acústica existente en un medio y la intensidad (o potencia) acústica de referencia.

#### **h) Impedancia acústica**

Relación entre la presión acústica y la velocidad de vibración de la partícula. Es un parámetro muy importante para determinar la proporción de energía que se refleja y la que se transmite cuando una onda acústica cambia de medio.

Al igual que le ocurre a la luz, cuando la onda ultrasónica llega a una interfase una parte es reflejada y otra transmitida. La proporción de energía reflejada depende en gran medida de la diferencia de impedancias entre los dos medios. Cuanto mayor sea la diferencia, mayor será la energía reflejada y menor la transmitida.

Esta característica presenta una gran importancia en las aplicaciones del ultrasonido. Si la producción de energía reflejada es mayor que la transmitida, los efectos del ultrasonido serán más intensos en la interface. Si por el contrario, la energía transmitida es mayor, los efectos podrán observarse en el interior del segundo medio (García, 2007).

### **i) Atenuación**

En la propagación de la onda ultrasónica por un medio, la intensidad de la onda disminuye al aumentar la distancia a la fuente que la produce. Este fenómeno es conocido como atenuación. Generalmente expresada en dB/m.

La atenuación puede ser consecuencia de la reflexión, la dispersión o la difracción de la onda durante su propagación, o como consecuencia de la conversión de parte de la energía cinética de la onda en calor (Mason & Lorimer, 2002).

Existen sistemas de aplicación en las que se pretende modificar las propiedades de los alimentos y analizarlas mediante el uso de ultrasonido de potencia. Para realizar este análisis se estudian la velocidad y la atenuación al propagarse la onda como principales parámetros, como es el caso del pretratamiento en el secado infrarrojo de betabel.

El análisis de alimentos por ultrasonido se basa en la relación existente entre las propiedades fisicoquímicas (composición, estructura, estado físico) y los parámetros ultrasónicos de los distintos productos sometidos a análisis (Parzanese, 2015). En McClements (1997) se realiza una revisión de las técnicas de ultrasonido aplicadas al estudio de alimentos, describiendo las técnicas y métodos más empleados y las propiedades de los alimentos en las que el ultrasonido ha demostrado su utilidad como herramienta de análisis. Más recientemente, en Camarena, Martínez-Mora, & Ardid (2007) se estudia el proceso de deshidratación de la cáscara de la naranja mediante medidas de atenuación y de velocidad del ultrasonido. Para medir las propiedades acústicas de los alimentos se pueden emplear diversos métodos de medida, usando diferentes tipos de señales y configuraciones.

Atendiendo al tipo de señal utilizada, la aplicación de ondas pulsadas facilita la separación en el tiempo de las ondas de ultrasonido que intervienen en la medida, lo que permite el cálculo de parámetros de ultrasonido de una forma simple, rápida y fácilmente automatizable. Por todo ello,

estas señales son ampliamente utilizadas en el análisis de alimentos en general (McClements D. , 1997).

Asimismo, se pueden emplear diversas técnicas de medida de ultrasonido para el análisis de alimentos como la técnica de transmisión. En la técnica de transmisión se requiere un transductor emisor de la onda de ultrasonido y uno receptor, la cual se describirá posteriormente en el capítulo 2.

Por medio de la relación entre la amplitud de la señal emitida y la recibida se puede obtener la atenuación sufrida (García-Alvarez et al., 2010). La velocidad del ultrasonido se puede calcular por medio del desfase temporal existente entre la onda incidente y la onda que atraviesa al alimento. Este desfase es producido por el retardo que sufre la onda al atravesar el alimento, de forma que conociendo la distancia entre los transductores se puede obtener dicho parámetro.

### **1.5.2 EFECTO DEL ULTRASONIDO**

Usualmente, el ultrasonido de alta potencia en un fluido continuo impone una presión acústica (Pa), además de la presión hidrostática que actúa sobre el medio. La presión acústica es una onda sinusoidal en función del tiempo, frecuencia y la amplitud máxima de la onda. Una onda sinusoidal es aquella que se ve en el osciloscopio. La amplitud máxima de la onda es directamente proporcional a la potencia de entrada del transductor. A baja intensidad (amplitud), la onda induce el movimiento y la mezcla dentro del fluido, conocida como corriente acústica (microcirculación). A intensidades más altas, la presión en la fase de expansión del ciclo, disminuye por debajo de la presión de vapor del líquido, creando burbujas (a partir de aire existente dentro del fluido). Estas burbujas podrían mantener un equilibrio, aumentando y disminuyendo el tamaño dando lugar a la denominada cavitación estable (Figura 9). Un aumento adicional genera presiones negativas dentro del fluido, que refuerzan el crecimiento de la burbuja y la producción de nuevas cavidades por el efecto de tensión sobre el fluido (Mason, 1998). Durante la compresión, la burbuja se contrae y su contenido es absorbido de nuevo en el líquido. Sin embargo, el área superficial de la burbuja es mayor y no todo el vapor se absorbe, por lo tanto la burbuja crece durante un número de ciclos (Patist & Bates, 2008) a un tamaño crítico hasta que se vuelven inestables y colapsan violentamente. Este último efecto se conoce como cavitación transitoria y las condiciones dentro de estas burbujas pueden ser con temperaturas de 5000 K y

presiones de hasta 1 atm, lo que produce una elevada fuerza de cizalla y turbulencia en la zona de cavitación (Soria & Villamiel, 2010).

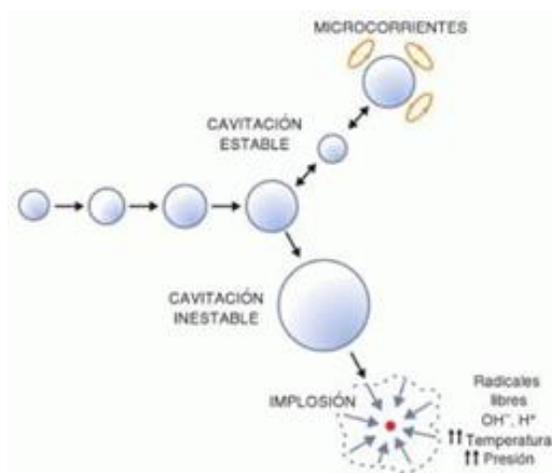


Figura 9: Clasificación de la cavitación (Valparaíso, 2007).

El proceso de compresión y expansión (rarefacción) por el cual se forman, crecen y colapsan las burbujas se conoce como “cavitación acústica”, es el efecto más importante en el ultrasonido de potencia y se ilustra en la Figura 10. A partir de este fenómeno, la formación y el comportamiento de la burbuja sobre la propagación de las ondas constituyen la mayoría de los efectos químicos del ultrasonido en alimentos, los cuales se describen más adelante (pag. 44-45 ).

La combinación de calor, presión y turbulencia se utilizan para acelerar la transferencia de masa en las reacciones químicas, crear nuevos caminos de reacción, romper y desprender las partículas (cavitación cercana a una superficie sólida) o incluso generar diferentes productos de los obtenidos en condiciones convencionales.

La cavitación acústica e hidrodinámica son capaces de generar intensidades requeridas para inducir cambios químicos y físicos en diferentes sistemas alimentarios. Con la cavitación, las moléculas de agua se pueden dividir para formar radicales libres, que intensifican las reacciones químicas y mejoran la velocidad de las reacciones de transporte de masa, debido a la generación de turbulencia y corriente acústica. Los radicales hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) y átomos de hidrógeno ( $\text{H}^-$ ) se generan a partir de la disociación de las moléculas de agua en soluciones acuosas como resultado de la alta temperatura y la presión del colapso de las burbujas de gas, asociados con la cavitación.

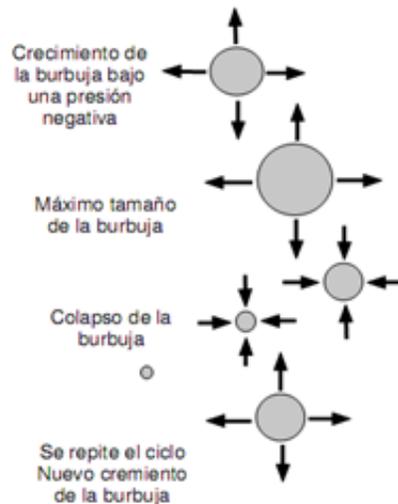


Figura 10: Proceso de cavitación (Jiménez, 2007).

Por tanto, es importante darse cuenta de que el ultrasonido de “alta potencia” no es una tecnología estándar, que la intensidad de la cavitación y sus efectos dependen de las características del medio, variables de proceso (tiempo de duración, intensidad de ultrasonidos, frecuencia), propiedades del producto (viscosidad,) y las condiciones ambientales (temperatura, presión), las cuales deben de tenerse muy en cuenta para cada aplicación.

Los ultrasonidos de potencia producen cambios en el alimento o en los procesos en los que son aplicados. Los efectos atribuidos al ultrasonido pueden ser muy diferentes, e incluso contrarios, en función del medio en el que se transmiten. Así, la mayoría de los efectos en medios líquidos están asociados a la cavitación, fenómeno que carece de importancia en medios sólidos (García, 2007).

Cuando la cavitación ocurre en un líquido cercano a la superficie de un sólido, cambia dramáticamente; colapsa de forma asimétrica, generando microburbujas que inciden en el sólido. Además, las microburbujas que golpean la superficie del sólido pueden producir una inyección de fluido en el interior del mismo.

En el caso de sólidos, se produce un efecto similar al observado cuando una esponja se comprime y libera repetidamente (De la Fuente et al., 2006). Este “efecto esponja” produce la liberación de líquido de la parte interna del sólido a la superficie y la entrada de fluido desde el exterior. Las fuerzas implicadas en este mecanismo puede ser mayor que la tensión superficial que mantiene

las moléculas de agua dentro de los capilares de material, creando canales microscópicos (Muralidhara, Ensminger, & Putnam, 1985) y haciendo los intercambios de materia más fácil.

Todos los efectos producidos por el ultrasonido de alta potencia en sistemas sólido-líquido podrían influir en los fenómenos de transferencia de masa, reduciendo la resistencia externa e interna. El efecto del ultrasonido en la cinética de transporte de masa puede aparecer hasta que se alcanza el umbral de intensidad acústica. Sin embargo, el nivel de intensidad acústica también puede afectar el tipo de influencia sobre el transporte de masa. En los tratamientos con un sólido sumergido en un fluido, el ultrasonido podría acelerar el transporte interno de entrada de fluidos en la matriz sólida y/o su salida más fácil y también facilitar los intercambios entre la superficie sólida y el líquido (Cárcel et al., 2012). Por último, los ultrasonidos producen un calentamiento del medio. La resistencia que ofrecen las partículas de un medio a la vibración y fricción entre ellas provocan la conversión de la energía acústica en calor. Esta absorción de energía puede ser especialmente importante en las interfases y se incrementa a medida que aumenta la frecuencia.

El calentamiento producido por el ultrasonido representa una elevación de unos pocos grados al inicio del tratamiento. En cambio en medios líquidos, el incremento de temperatura puede resultar significativo (Raso et al., 1999; Mulet et al., 2003b).

### **1.5.3 SISTEMAS DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDO**

Los sistemas de aplicación de ultrasonido de potencia tienen dos requisitos principales: un medio de propagación y una fuente de vibraciones de alta energía. Estos sistemas se han utilizado en procesos industriales. Y su aplicación en el proceso de alimentos, se puede dar de tres maneras (Chemat, Zill-e-Huma, & Khan, 2011)

- Aplicación directa al producto
- Acoplada a un dispositivo
- Sumergido en un baño ultrasónico

En este caso en particular, el equipo necesario para el sistema ultrasónico consta de tres partes fundamentales: baño ultrasónico, hidrófono y osciloscopio. El baño ultrasónico tiene integrado en la base de un recipiente de acero inoxidable los transductores piezoeléctricos que están conectados al sistema de vibración cuya función consiste en transmitir la vibración desde el transductor al medio y amplificarla. El hidrófono suministra la información sobre la frecuencia,

amplitud y periodo. El osciloscopio (Figura 11) captura la señal creada por el hidrófono, y sirve como almacenamiento digital de datos, conectado en interfase a una computadora personal.

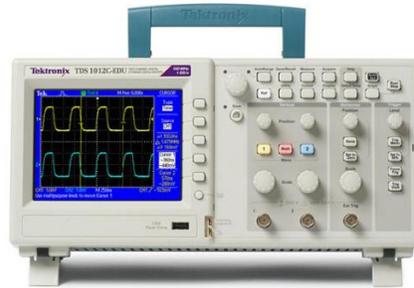


Figura 11: Osciloscopio

En aplicaciones con líquido, los sistemas más comúnmente empleados son los baños ultrasónicos que pueden ser adaptados para diferentes operaciones. En estos, algunos transductores vibran en fase, transmitiendo la vibración al contenido del líquido. Debido a la reflexión de las ondas ultrasónicas en la interfase aire-líquido, con zonas de intensidad máximo y mínimo, que se crea en su interior. Entonces, el tratamiento ultrasónico aplicado puede cambiar dependiendo de la ubicación de las muestras.

#### **1.5.4 PRETRATAMIENTO ULTRASÓNICO**

El ultrasonido de alta intensidad tiene la característica de trabajar de forma sinérgica con otras formas de energía con el fin de promover, acelerar o mejorar muchos procesos. Esta es la razón por la cual se aplica como pretratamiento. Un pretratamiento se puede utilizar para reducir el contenido inicial de agua o para modificar la estructura (Fernandes & Rodrigues, 2007a).

El pretratamiento ultrasónico en un sistema de aplicación sólido-líquido implica la inmersión del alimento en agua aplicando el ultrasonido. La ventaja de utilizar el ultrasonido es que el proceso se lleva a cabo a temperatura ambiente y no se requiere calentamiento, reduciendo la probabilidad de degradación de los alimentos (Mason, 1998).

Las primeras referencias sobre secado empleando el ultrasonido como pretratamiento son anteriores a la primera mitad del siglo XX. Aunque el interés por la tecnología no creció hasta la publicación de una serie de artículos sobre el secado empleando el ultrasonido como pretratamiento de materiales sensibles al calor, debido a las ventajas de emplearlo, que

incrementan la velocidad de secado. Este efecto está asociado al efecto esponja que provoca el ultrasonido de potencia en sólidos.

Como anteriormente se ha indicado, los ultrasonidos de potencia pueden causar cambios en el alimento en los que se aplica para afectar a la transferencia de masa en los sistemas sólido-líquido en procesos tales como la deshidratación osmótica de manzanas (Cárcel et al., 2007b) y el salado de la carne (Cárcel et al., 2007c)

Fernandes & Rodrigues (2007a) aplicaron ultrasonidos de potencia en sistemas sólido-líquido usando un baño ultrasónico, como un pretratamiento al secado por aire caliente de plátanos. Se observó un aumento en la difusión de la humedad después de la aplicación de ultrasonidos y una disminución en el tiempo total del proceso, en comparación con el tratamiento previo en una solución hipertónica seguido por secado con aire caliente.

Jambrak et al. (2007) emplearon el ultrasonido de potencia como pretratamiento al secado convectivo debido a su influencia en la estructura del producto, compararon la influencia de la sonicación de muestras de champiñón, col de Bruselas y coliflor en agua destilada utilizando un baño (40 kHz). El tiempo de secado disminuyó en algunas de las muestras sonicadas.

A pesar del potencial que tiene el ultrasonido de alta intensidad, actualmente la aplicación de esta tecnología en el secado de hortalizas en un medio sólido-líquido esta poco desarrollada.

### **1.5.5 VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL ULTRASONIDO**

Las principales ventajas del ultrasonido son:

- Preciso.
- Versátil para la industria.
- Seguro y confiable
- Aumenta la eficiencia de la producción.
- Reducción de peligros químicos y físicos.
- Es una técnica rápida respecto a otras técnicas aplicadas en la industria de alimentos.
- A diferencia de otros métodos físicos pueden aplicarse con éxito en sistemas concentrados y opacos.

- Es útil para la inhibición y disminución de microorganismos termorresistentes y en aquellos alimentos que aumentan la resistencia de los microorganismos.
- Posible modificación de la estructura y textura en alimentos.
- Pocos requerimientos de adaptación en plantas ya establecidas.
- Puede emplearse en procesos continuos o intermitentes.

Por otra parte sus limitaciones implican que, actualmente es difícil hallar equipos de ultrasonidos diseñados para ser usados en industrias alimenticias.

# **CAPITULO 2: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

---

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la influencia del pretratamiento ultrasónico en la pérdida de humedad y color durante el secado por infrarrojo de betabel (*Beta vulgaris*).

### **OBJETIVOS PARTICULARES**

1. Determinar la influencia de los parámetros ultrasónicos (atenuación- $\alpha$  y velocidad de propagación-c) a diferentes tiempos de pretratamiento en la pérdida de humedad y color durante el secado por infrarrojo del betabel (*Beta vulgaris*).
2. Evaluar el coeficiente de difusión durante el secado por infrarrojo del betabel (*Beta vulgaris*) a diferentes temperaturas para determinar la influencia del pretratamiento ultrasónico.

De acuerdo a los objetivos planteados se realizaron diferentes actividades y análisis estadístico, describiéndose a continuación:

### 2.1 SELECCIÓN DE MATERIA PRIMA

La materia prima adecuada es altamente determinante para el cumplimiento de los objetivos propuestos. Por lo tanto tiene que cumplir con ciertos requisitos básicos. El betabel (*Beta vulgaris*) fue comprado en una tienda comercial y se seleccionó de acuerdo a uno de los dos indicadores de cosecha, el cual implica medir el diámetro del “bulbo” de entre 8 a 10 cm (SAGARPA, 2014). Posteriormente se cortaron con un molde para obtener el espesor de 1 cm y con el vernier digital (Starrett No. 721) se midió el largo de 2 cm, obteniendo placas de 2x1x1 cm.

### 2.2 CONTENIDO DE SÓLIDOS SOLUBLES

Los sólidos solubles son todas aquellas sustancias que normalmente se presentan en estado sólido bajo condiciones ambientales pero que en ciertas circunstancias pasan a formar parte de una solución y solo pueden ser detectados con los instrumentos adecuados, determinando la cantidad aproximada que existen en la muestra en escala de grados brix ( $^{\circ}$ Brix).

La porción o muestra de betabel fue tomado de las extremidades del bulbo, cortándolo, como se muestra en la Figura 12, y extrayendo su jugo,

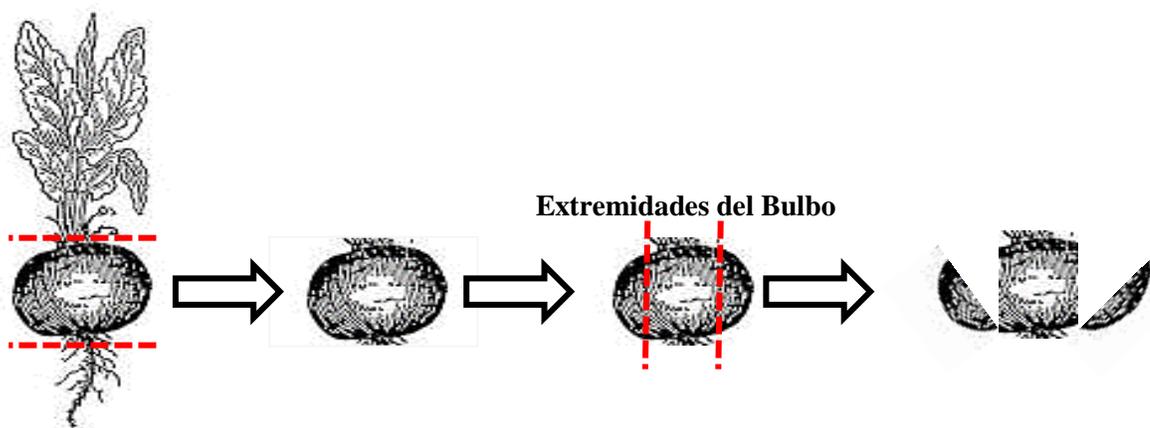


Figura 12: Representación esquemática del corte de la muestra.

Se realizó la determinación de los  $^{\circ}$ Brix en muestras de jugo de betabel, mediante un refractómetro manual Sper Scientific 300003 (AZ, EUA). Los valores obtenidos representan el % de sacarosa contenido en la materia prima.

### 2.3 CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad de la hortaliza se determinó por calentamiento de las muestras empleando un horno convectivo 9023A (Ecoshel, MX) a 70°C por tres horas hasta peso constante, según el método del AOAC 931.04 (1990), antes y después del pretratamiento ultrasónico.

La preparación de la muestra equivale a 5 g de betabel cortado en tozos, procedente de las extremidades del bulbo (Figura 11) y colocadas en una charola de aluminio.

El método utilizado para determinar la humedad utilizando estufa, incluye la preparación de la muestra, pesado, secado, enfriado y pesado nuevamente de la muestra.

Posteriormente se calculó el porcentaje de humedad (%X) empleando la ecuación 4, en donde  $P_i$  es la masa inicial de la muestra,  $P_f$  es la masa final de la muestra y  $P_{CV}$  es la masa de la charola de aluminio.

$$\% X = \left[ \frac{P_i - P_f}{P_i - P_{CV}} \right] 100 \quad (4)$$

### 2.4 COLOR

La pérdida de color es el síntoma externo más evidente de la degradación y síntesis del pigmento (betacianina). El color característico del betabel es el rojo, si la hortaliza se corta el pigmento se convertirá a un color marrón mate.

El color se determinó por el método de imagen digital según Yam & Papadakis (2004), antes y después del pretratamiento ultrasónico y al finalizar el secado por infrarrojo. Consistió en la toma de imágenes empleando una cámara digital Cyber Shot DSC-W130 (SONY, JP) y el software Photoshop CS5 para analizar el color.

La cámara digital con una resolución de 8.1 megapíxeles, modo automático en función macro activado, ISO automático, compensación de exposición (EV=0,0), flash desactivado y DISP con histograma, se colocó en una base de tripie en un ángulo de 90°. La iluminación se realizó con una

lámpara incandescente (luz de día) haciendo incidir el haz de luz en un ángulo de 45°, sobre un fondo negro. La intensidad de la luz sobre la muestra debe ser uniforme (Riva, 2003).

Con las imágenes en formato TIFF, se determinó la distribución del color de la hortaliza con la ventana "Histograma" en Photoshop, la cual despliega las estadísticas (media, desviación estándar, mediana etc.) de los parámetros de color, luminosidad, a y b.

Luminosidad, a y b no son valores de color estándar y pueden ser convertidos a una escala CIE  $L^*a^*b^*$  (Commission Internationale de l'Eclairage), calculando:

$$L^* = \left( \frac{\text{Luminosidad}}{255} \right)^{10} \quad (5)$$

$$a^* = \left( \frac{240}{255} \right) - 120 \quad (6)$$

$$b^* = \left( \frac{240}{255} \right) - 120 \quad (7)$$

Los parámetros de  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  constan de un componente de luminosidad (brillo), tomando valores entre 0 (negro) y 100 (blanco), junto con dos componentes cromáticos (desde -120 a +120): el componente  $a^*$  (de verde a rojo) y el componente  $b^*$  (de azul a amarillo). Posteriormente se determinó la diferencia de color, conocido como  $\Delta E^*$ . La expresión de esta diferencia de color son  $\Delta L^* \Delta a^* \Delta b^*$ , entonces:

$$\Delta E_{Lab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (8)$$

## 2.5 ADAPTACIÓN DEL SISTEMA PARA LA APLICACIÓN DE ULTRASONIDO

El equipo empleado para la técnica de transmisión, la propagación y recepción de las ondas ultrasónicas a través de un medio líquido (agua destilada), como se observa en la Figura 13 y consta principalmente de:

- ✓ Baño Ultrasónico sin agitación mecánica 08895-04 (Cole Parmer, EUA)
- ✓ Osciloscopio TDS1001C-EDU (Tektronix, EUA)
- ✓ Hidrófono H1a (Aquarian Audio Products, EUA)

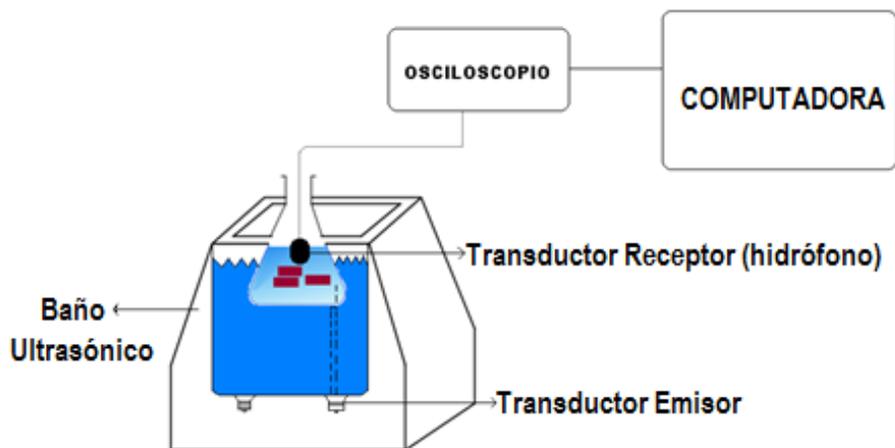
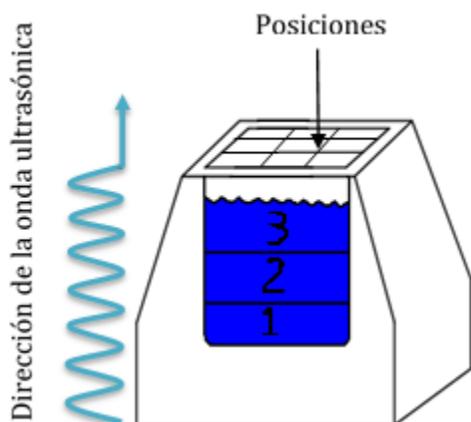


Figura 13: Esquema representativo del montaje del equipo

El baño ultrasónico se caracterizó a diferentes alturas (distancia con respecto al fondo del equipo) y posiciones, como se observa en la Figura 14 y Cuadro 3. La recepción de las ondas ultrasónicas se llevó a cabo por el hidrófono, introduciéndolo en las diferentes posiciones del baño ultrasónico con agua destilada durante 50 segundos a temperatura ambiente ( $\pm 25^{\circ}\text{C}$ ) y conectado al osciloscopio, registrando los valores de amplitud para determinar la altura con los mayores valores. Una vez localizada la altura, se posicionó un vaso de precipitado (600 mL) con agua destilada, sumergiendo el hidrófono en el interior del vaso durante 10 y 30 minutos a temperatura ambiente, registrando los valores de amplitud y periodo en el osciloscopio.

La conexión en interfaz del osciloscopio y la computadora personal permitió acceder a los valores obtenidos a lo largo de la experimentación por medio del complemento TekXL Toolbar.



Cuadro 3: Medidas y posiciones del baño ultrasónico

Zona	Altura (cm)	Posiciones		
1	3	1	2	3
2	5	4	5	6
3	7	7	8	9

Figura 14: Zonas del baño ultrasónico a diferentes alturas.

El osciloscopio se configuró con base al manual de las series TDS2000C y TDS1000C-EDU en interfaz con el baño ultrasónico, quedando finalmente las siguientes condiciones:

Cuadro 4: Configuración del osciloscopio

Menú o Sistema	Botón o Mandos de Opción	Valor Predeterminado
Adquisición	Promediado	64
Pantalla	Interpolación	Vectores
	Persistencia	No
	Formato	Y (t)
Disparo	Tipo	Flanco
	Fuente	CH1
	Pendiente	Positiva
	Modo	Normal
	Acoplamiento	Filtro ruido
Cursores	Fuente	CH1
	Vertical (tiempo)	50.00 mV
Horizontal	Ventana	Base Tiempos Principal
	Mando Disparo	Nivel
	Posición	0.00 s
	Escala (segundos/división)	5.00 $\mu$ s
Sistema Vertical	Acoplamiento	CC
	Limitar ancho de banda	No
	Invertir	No

La computadora personal contiene un complemento en Excel llamado TekXL Toolbar, es una práctica herramienta que se utiliza para importar directamente los valores de forma de onda, medidas y capturas de pantalla del osciloscopio en una hoja de Excel. El complemento se empleó debido a la facilidad de la obtención específica de valores como la amplitud, periodo y frecuencia a lo largo de esta experimentación.

## 2.6 PRETRATAMIENTO ULTRASÓNICO

El pretratamiento se realizó en un conjunto experimental de 135 muestras de betabel que se sumergieron en agua destilada, dentro de vasos de precipitado (600 mL) a temperatura ambiente en un baño ultrasónico a 40 kHz sometiénolas a ondas ultrasónicas durante 10 y 30 min. La relación agua destilada-hortaliza se mantuvo 4:1 (base en peso), esta proporción se utilizó debido a estudios anteriores de Fernandes & Rodrigues *et al.*, (2006) y Teles *et al.*, (2006).

Al finalizar el pretratamiento se drenaron las placas de betabel llevando a cabo el secado infrarrojo y determinando el contenido de humedad, sólidos solubles y pérdida de color.

### 2.6.1 PARÁMETROS ULTRASÓNICOS

Aplicando la técnica de transmisión y con los valores obtenidos de amplitud y periodo con y sin placas de betabel, se calculó la atenuación ( $\alpha$ ) empleando la ecuación 9, y la velocidad ultrasónica ( $c$ ) con la ecuación 10 para cumplir el objetivo particular 1. Los valores para determinar la velocidad ultrasónica emplearon un procedimiento descrito en Camarena & Martínez-Mora (2006).

$$\alpha = \frac{\ln A_1}{d} - \frac{\ln A_2}{d} \quad (9)$$

Donde  $A_1$  y  $A_2$  son la amplitud de la señal emitida y recibida respectivamente, y  $d$  la distancia entre los transductores.

$$c = \frac{d}{\Delta T} \quad (10)$$

Siendo  $\Delta T$  el intervalo de tiempo entre la onda incidente y recibida.

## 2.7 PROCESO DE SECADO POR INFRARROJO

Las placas de betabel se pesaron y distribuyeron en posiciones determinadas en la porta rejilla del secador infrarrojo FlavorWave Oven Turbo (Thane Housewares, EUA), como se observa en las Figuras 15 y 16. Determinando la pérdida de humedad en la muestra con respecto al tiempo, a 65°C y 80°C, durante 1:30 h a velocidad media del equipo correspondiente a 4.93 m/s, según Flores (2014). En intervalos de 10 minutos se sustrajeron 4 placas del equipo para pesarlas, realizando 3 repeticiones.

El peso de las placas antes y después del secado infrarrojo, se empleó para obtener el porcentaje de humedad final y realizar la cinética de secado.

El proceso de secado infrarrojo en las placas de betabel se llevó a cabo con y sin pretratamiento ultrasónico para evaluar la influencia del ultrasonido.

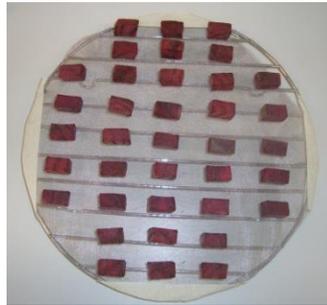


Figura 15: Acomodo de las placas de betabel    Figura 16: Secador infrarrojo

### 2.7.1 CÁLCULO DE DIFUSIÓN EFECTIVA

A partir de los datos de la cinética de secado de humedad en base húmeda contra el tiempo, se obtuvieron los puntos intermedios no experimentales, haciendo un ajuste de la curva con el programa Sigma-Plot 10. A partir del ajuste de los datos de la cinética, del programa se obtuvo la humedad crítica.

La humedad en equilibrio se obtuvo considerando una cinética de primer orden, de acuerdo a lo propuesto por Rastogi & Raghavarao (2004).

Una vez obtenidos los valores de humedad crítica y humedad en equilibrio, se procedió a determinar la difusión efectiva ( $D_{ew}$ ); teniendo en cuenta una geometría de placa infinita (2x1x1), como se describió en el capítulo 1 con las ecuaciones 2 y 3, para cumplir con el objetivo particular 2 y establecer la influencia del pretratamiento ultrasónico en el secado infrarrojo.

En el periodo de velocidad decreciente donde  $M_r \leq 0.6$  solo el primer término de la ecuación 3 es significativo y los otros términos se pueden despreciar, cuando se aplica a la difusión dependiente de la concentración estando relacionada con las características estructurales del alimento (Crank, 1975).

Considerando que el secado se realizó por dos caras y con las condiciones límites  $C_0=0$   $t=0$ ;  $C_1=cte$   $t>0$  y el espesor se sustituyó por  $L$  en la ecuación 11.

$$M_t = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 D_{ew} t}{2L^2}\right) \quad (11)$$

El coeficiente de difusión se determinó a partir de la pendiente de la curva ( $m$ ) obtenida de la regresión no lineal de la ecuación 12 (Rastogi & Raghavarao, 2004).

$$\ln M_t = \ln \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{-\pi^2 D_{ew} t}{2L^2}\right) \quad (12)$$

La pendiente de la curva de  $\ln M_t$  vs  $t$  se resolvió para el coeficiente de difusión de la siguiente manera:

$$m = -\frac{D_{ew} \pi^2}{2L^2} \quad (13)$$

$$D_{ew} = -\frac{2L^2 m}{\pi^2} \quad (14)$$

### 2.7.2 CINÉTICA DE LA DIFUSIÓN EFECTIVA

El modelo cinético propuesto por Azuara et al. (1992) y ajustado al secado convectivo, se desglosa a partir de la ecuación 15, en donde es necesario obtener los valores de los parámetros  $S_1$  y  $WL_\infty$ .

$$WL = \frac{S_1 t (WL_\infty)}{1 + S_1 t} \quad (15)$$

Donde  $WL$  representa los datos obtenidos de los respectivos parámetros y pueden determinarse utilizando los datos experimentales, a partir de la pendiente y la ordenada al origen de la recta ( $t/WL$ ) versus  $t$  utilizando la ecuación 1.

Basada en la segunda ley de Fick para una placa infinita en relación al modelo de Azuara et al. (1992), la ecuación para la determinación de la difusión efectiva a cada tiempo queda de la siguiente manera:

$$D_{ew} = \frac{2L^2}{\pi t} \left[ \left( \frac{S_1 t}{1 + S_1 t} \right) \left( \frac{W_{L_\infty}^m}{W_{L_\infty}^e} \right) \right] \quad (16)$$

En la cual,  $W_{L_\infty}^m$  es el valor en el equilibrio que se obtuvo para la ecuación 15, es decir, la inversa de la pendiente del gráfico  $t/WL$  vs  $t$ ;  $W_{L_\infty}^e$  es el valor de la humedad en equilibrio ( $X_e$ ) que se obtuvo de la experimentación.

## 2.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La confiabilidad de los datos experimentales incurre en el análisis estadístico empleado. Estadísticamente, las medidas de tendencia central y dispersión, así como los ANOVA sustentarán el desarrollo experimental de este proyecto.

Los análisis estadísticos se realizaron con MINITAB 15. La determinación de selección de materia prima, sólidos solubles y humedad se llevaron a cabo con 5 repeticiones, de donde se obtuvieron los promedios y la desviación estándar.

Con respecto al color y a la pérdida de color con y sin pretratamiento, se realizó una ANOVA de una vía en cada corrida experimental, obteniendo los valores promedio de las replicas y otro ANOVA de dos vías para los valores promedio entre repeticiones.

Se consideró como unidad experimental a cada placa de betabel en el secado infrarrojo. El peso inicial y final de las placas para cada tiempo se consideraron como variables de respuesta; se realizó un ANOVA de dos vías en cada corrida experimental para obtener los valores promedio entre repeticiones y otro ANOVA de dos vías para los valores promedio entre replicas. En los casos necesarios se aplicó una prueba de contrastación de Turkey con un intervalo de confianza del 95% para obtener los valores estadísticamente válidos.

Por consiguiente se eliminaron los valores atípicos, aplicando posteriormente los promedios y regresión no lineal para calcular la cinética de secado y difusión efectiva.

# **CAPITULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

---

### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Efectuando la caracterización del betabel, se muestran los resultados promedio. Se identificó el diámetro de la materia prima en cada sesión experimental sin pretratamiento ultrasónico, el valor fue de  $8.75 \pm 0.46$  cm.

SAGARPA (2014), emplea el diámetro como indicador de cosecha que oscila entre 8-10 cm. Por lo tanto es un valor aceptable.

El contenido de sólidos solubles en el jugo de betabel presentó un valor de  $13.03 \pm 1.09^\circ$ Brix, contenido aproximado al reportado por Mejía (2012) de  $10.2^\circ$ Brix. Perteneciente a la misma familia del orden *Centrospermae* del betabel, está la tuna morada (*Opuntia ficus-indica*), la cual debe contener sólidos solubles totales mayor del 12%, de acuerdo a SAGARPA (2005). El resultado obtenido en el presente estudio está dentro del reportado en la literatura para el orden *Centrospermae*.

En hortalizas de betabel la humedad representa el 87.5%, según Corona (2007). En la experimentación, el valor promedio fue de  $87.05 \pm 0.26\%$ , todos los valores obtenidos fueron cercanos al reportado en la bibliografía, teniendo un coeficiente de variación de 0.30%.

Con respecto al color, los resultados promedios obtenidos están localizados en el primer cuadrante del esquema de colorimetría CIELAB (Figura 17), el valor de luminosidad ( $L^*$ ) de 46.50, se debe a la lámpara incandescente y el fondo negro empleados al momento de realizar la técnica, logrando un equilibrio. En cuanto a los otros dos parámetros,  $a^*$  de 41.73 y  $b^*$  de 15.68, indican la presencia de pigmentos betacianinas y betaxantinas, que pertenecen al grupo de pigmentos conocido como betalaínas de coloración roja (Stintzing & Carle, 2007).

Como se observó en las actividades anteriores, no hay variación significativa de los resultados obtenidos y el reportado en la bibliografía, dado que todo el betabel se obtuvo de la misma tienda comercial. Por lo tanto, en todas las sesiones experimentales no hubo variación significativa en la materia prima, por lo que los resultados de actividades posteriores pudieron ser comparados.

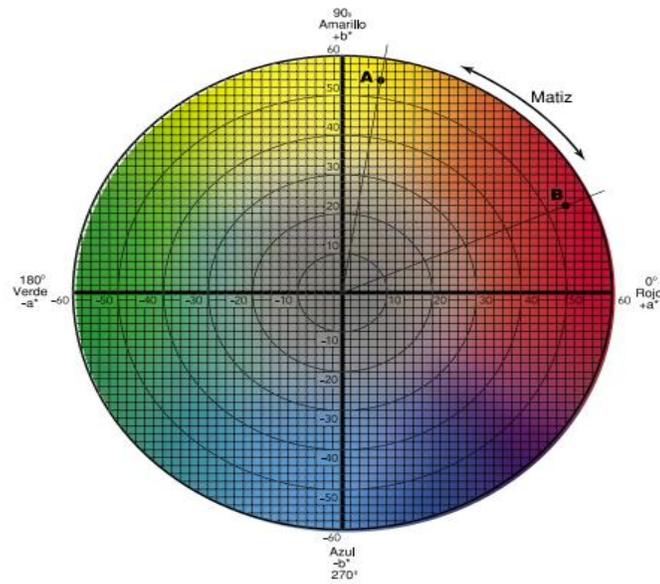


Figura 17: Esquema de colorimetría CIELAB

### 3.2 APLICACIÓN DE ULTRASONIDO

Una vez efectuada la adaptación del equipo, llevada a cabo con la metodología correspondiente, se obtuvieron los valores promedio de amplitud en voltios (V) para cada una de las zonas propuestas en la posición 5 (ver cuadro 2), como se observa en el cuadro 5, así como la desviación estándar.

Paz (2015) sustenta que la posición en el baño ultrasonico no tiene efectos significativos. Por tal motivo se seleccionó la posición 5, ubicada en el centro del equipo, en donde se generó un sonido audible al oído humano, debido a que se formaron 42 000 ciclos por segundo, es decir, que tiene una frecuencia de 42 kHz, la cual se mantuvo constante a lo largo de la experimentación, constatando que el tipo de onda es senoidal, produciéndose en  $2.38 \times 10^{-5}$  segundos.

Cuadro 5: Amplitud de onda promedio en diferentes zonas

Zona	Altura (cm)	Posición 5 (V)
1	3	$0.109 \pm 9.03 \times 10^{-6}$
2	5	$0.101 \pm 6.11 \times 10^{-6}$
3	7	$0.096 \pm 2.31 \times 10^{-6}$

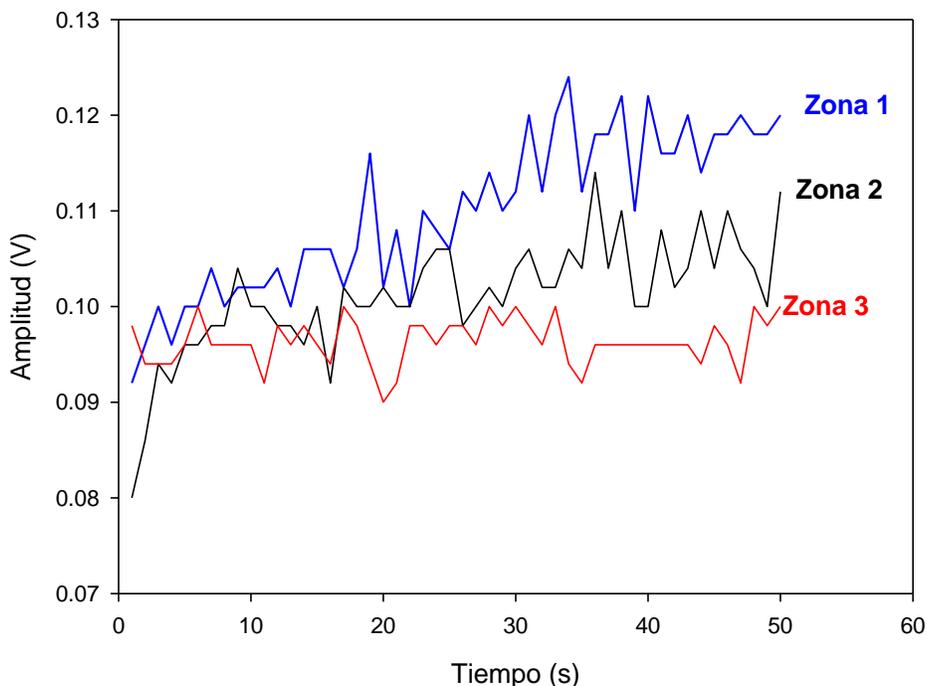


Figura 18: Posición adecuada en el baño ultrasónico

La Figura 18 y cuadro 5, muestran que la zona 1 tiene una mayor amplitud de la onda con una mayor intensidad, eligiéndola de entre las otras zonas, debido a la variación en la amplitud al modificar la altura del transductor receptor (hidrofono), cabe mencionar que la altura es la distancia con respecto al fondo del baño ultrasónico, observando que conforme se aleja del transductor emisor da como resultado una menor amplitud de onda, esto es lo que se conoce como atenuación de la onda, posiblemente debido a la absorción o disipación de la onda y al fenómeno de reflexión. La causa principal de la absorción, en el caso de las ondas mecánicas, es la fricción que hace que la energía mecánica se transforme en calor, lo cual generó burbujas diminutas en la zona de dilatación.

La forma de la variación en la amplitud es llamada envolvente de la onda, que se obtiene uniendo los ciclos sucesivos en forma de línea de trazos (Figura 18).

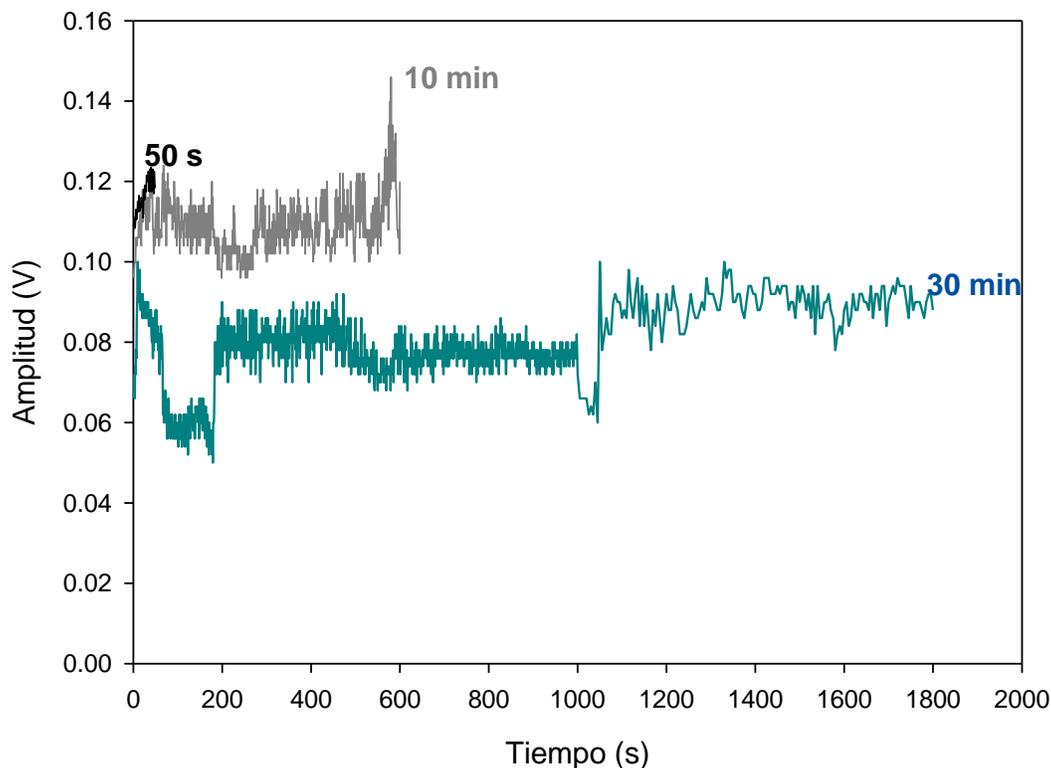


Figura 19: Amplitud emitida a diferentes tiempos.

En lo que corresponde a la aplicación del ultrasonido a tiempos prolongados en la zona 1, se observa en la figura 19 que, durante los 30 minutos ocasionó una gran disminución en la amplitud de onda, ya que se absorbe parte de la onda por un material que sea aislante acústico, en este caso el vidrio borosilicato del cual está fabricado el vaso de precipitado.

Otro factor es la impedancia acústica, debido a que la propagación de la onda ejerce en cada contacto con las moléculas del líquido una fuerza de compresión y expansión asimétricas, que al tener contacto con la superficie del vaso de precipitado, actúa con un fuerte efecto mecánico, formando un “microjet” y ondas de choque.

### 3.3 PRETRATAMIENTO ULTRASONICO

#### 3.3.1 PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS

En el cuadro 6 se muestran los resultados promedio de los parámetros físicos y químicos del betabel al finalizar el ultrasonido durante 10 y 30 min, así como la desviación estándar.

Cuadro 6: Características físicas y químicas del betabel con pretratamiento.

Parámetros	Con Pretratamiento	
	10 min	30 min
°Brix	10.75±1.06	8.86±2.93
Humedad (%)	84.75±0.58	85.88±0.42
L*	37.66±1.20	37.19±0.07
a*	33.79±5.02	35.41±3.17
b*	6.96±3.75	7.89±2.14
ΔE	5.97±0.54	5.24±0.38

A partir de estos valores, el contenido de sólidos solubles totales presentó una variación con respecto al tiempo, disminuyéndolos 2.28 °Brix durante 10 min y 4.17°Brix a 30 min, con respecto al valor inicial de 13.03±1.09°Brix, corroborándolo con un análisis ANOVA de una vía, los resultados se presentan con un diagrama de caja en la Figura 20. Este comportamiento se debe al aumento de la temperatura, mayor de 25°C (SIAP, 2014), originado por el baño ultrasónico y que durante la experimentación fue ≤3°C.

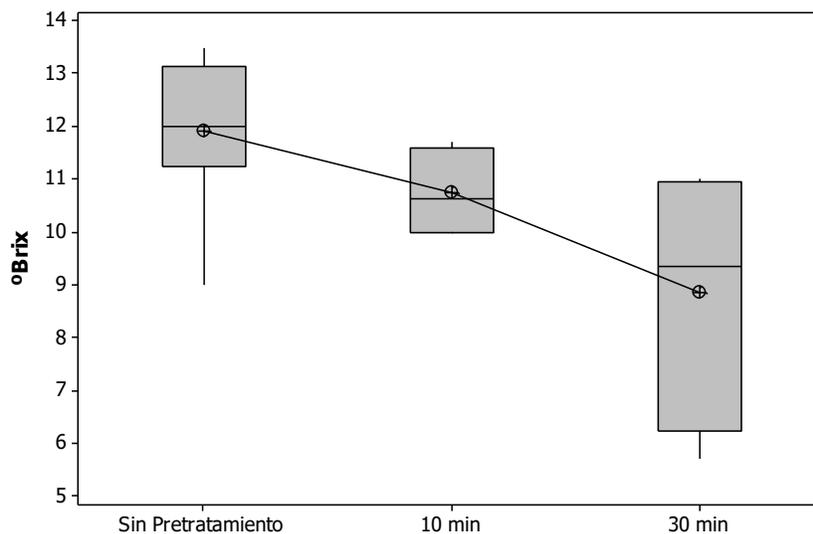


Figura 20: Diagrama de caja para los sólidos solubles totales

Otro factor, de acuerdo con Mason, Paniwnyk, & Lorimer (1996) son los efectos mecánicos del ultrasonido de potencia, los cuales proporcionan una mayor penetración del agua destilada en el betabel, que resulta de la ruptura de las paredes celulares biológicas facilitando la liberación de los compuestos orgánicos. Esto lo ha demostrado Chendke & Fogler (1975) en un estudio de extracción ultrasónica de azúcar a partir de betabel y Fernandes & Rodrigues (2011), en donde evaluaron el efecto del ultrasonido como pretratamiento en varias frutas: plátano, papaya, melón, fresa, zapote, manzanas, carambola y piñas.

Por otro lado, la humedad presentó un decremento en ambos tiempos de pretratamiento en comparación al valor promedio inicial de  $87.05 \pm 0.26\%$ , coincidiendo que a 10 min se obtuvo un 84.74% de humedad con una disminución del 2.3% y a 30 min de exposición solo se logró el 85.88% de humedad. Sin embargo, cabe destacar que estas diferencias no fueron significativas, como se observa en el diagrama de caja correspondiente a un análisis estadístico ANOVA en una vía (Figura 20). Los factores que pudieron haber afectado a un decremento en la humedad es la exposición a mayores amplitudes de onda, la corta distancia entre los transductores (emisor y receptor) de 0.03 m y el tiempo de exposición a las ondas ultrasónicas, esto podría deberse a que los alimentos pierden agua durante el pretratamiento en un medio líquido (Fernandes & Rodrigues, 2011), indicando que a tiempos prolongados el ultrasonido no afecta a esta propiedad química

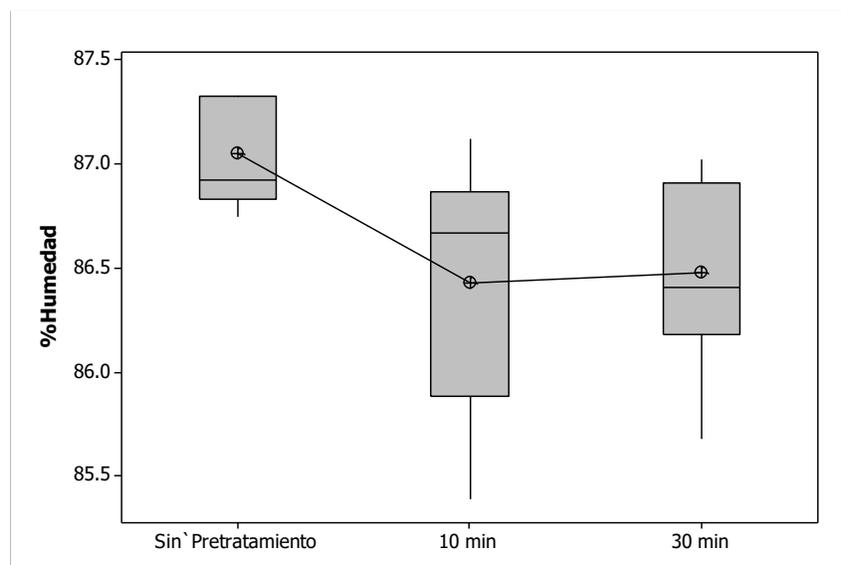


Figura 21: Diagrama de caja para humedad

Awad et al., (2012) mencionan que la cavitación acústica e hidrodinámica generan intensidades necesarias para inducir cambios químicos y físicos en diferentes sistemas de alimentos como se observa en la disminución del porcentaje de humedad y color.

La pérdida de color durante el pretratamiento con ultrasonido se observa en la disminución de  $a^*$  y  $b^*$  con respecto al valor promedio inicial de 41.73 y 15.68, respectivamente. A 10 min presenta la mayor disminución con una  $a^*$  de 33.79 y  $b^*$  de 6.96, en comparación con 30 min, manteniéndose en el primer cuadrante del esquema de colorimetría CIELAB y exhibiendo un decremento en las betaxantinas y las betacianinas de un rojo a violeta como se observa en la figura 21, esto podría atribuirse a que las betalaínas son hidrosolubles a un aumento en el pH ( $>7$ ), según Jackman & Smith (1992), también a la penetración del oxígeno en las muestras tratadas; ya que la cavitación genera radicales libres, los cuales tienen efecto en la betanina (Saguy et al., 1984), corroborándolo con la disminución de  $L^*$  en 37.66. Mientras que la diferencia de color ( $\Delta E$ ) del betabel entre sin/con pretratamiento, presenta cambios notables o evidentes con resultados mayores a 5, según la ISO 12647-2 (2004).

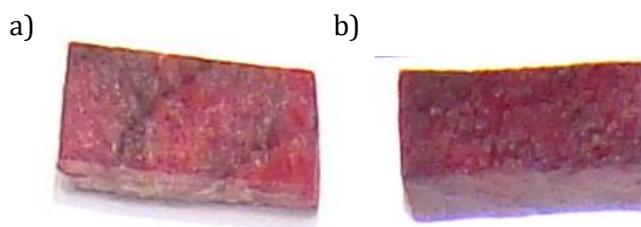


Figura 22: Fotografías del cambio de color en el betabel antes del secado.  
a) Sin pretratamiento b) Con pretratamiento

### 3.3.2 PARAMETROS ULTRASÓNICOS

Los parámetros ultrasónicos relacionan el progreso de los cambios en las propiedades del betabel durante el pretratamiento a condiciones ambientales. Los resultados han mostrado que los cambios en las propiedades físicas y químicas con/sin tratamiento ultrasónico están fuertemente relacionados con el tiempo de exposición. Estableciendo la influencia que tiene el ultrasonido de potencia en el betabel.

El cuadro 7 muestra los datos promedios del coeficiente de atenuación ( $\alpha$ ) y la velocidad de propagación ( $c$ ).

Cuadro 7: Datos de los parámetros ultrasónicos a diferentes tiempos

Parámetro	Tiempo	
	10 min	30 min
$\alpha$ (dB/m)	25.3±8.52	8.54±3.72
c (m/s)	1242±0.87	1404±0.59

Los resultados de velocidad de propagación varían en promedio entre 1240-1400 m/s dependiendo del tiempo de pretratamiento y el cambio que se genera al pasar de un medio de propagación a otro (Franco A. , 2000), su aumento se debe al incremento de temperatura del medio en que se propaga. Datos similares han sido reportados por Bamberger & Greenwood (2004) y O'Brien (2007).

En el segundo 30 la velocidad disminuye a 1240 m/s, manteniéndose durante 10 min, en donde la alteración de la onda ocasiona la disminución de la velocidad de propagación y probablemente se deba a la impedancia acústica, el fenómeno de reflexión y refracción. Entonces, si la velocidad de propagación del agua destilada a 25°C es de 1497 m/s (Elvira, 2000) podríamos decir que, la propagación es tan rápida a través del agua destilada contenida en el baño ultrasónico hacia la base y superficies laterales del vaso de precipitado (interfase), atravesándola al siguiente medio de propagación (agua destilada con betabel), lo cual es una forma indirecta de emplear el ultrasonido.

El fenómeno de reflexión se llevó a cabo cuando la onda incidente chocó con el vaso de precipitado con una longitud de onda igual o mayor que su longitud de onda. Hay diversos factores que intervienen e influyen, el más importante es el material del que está constituido el objeto con el que choca. El vidrio de borosilicato provoca reacciones beneficiosas, reforzando una propagación de onda directa, debido a que el ángulo con el que se refleja la onda es idéntico al ángulo incidente de choque cuando este efecto se produce sobre objetos lisos y rígidos (Hernando & Pérez, 2009), como el vaso de precipitado.

Una parte de la onda incidente se refleja y la otra se transmite cuando tiene contacto con el vaso de precipitado, esto quiere decir que, la energía ultrasónica se propaga hasta que se encuentra con un cambio de impedancia, lo que significa que hay algunos cambios en la velocidad de propagación (Kuttruff, 1991). Parte de la energía se refleja y depende del cambio de impedancia.

Mientras que la amplitud de la onda reflejada y la amplitud de la onda transmitida son menores que la amplitud de la onda incidente, ocasionando que la velocidad acústica reflejada se mantenga, y la transmitida tiene una velocidad de propagación que depende del agua destilada y betabel dentro del vaso de precipitado. La onda reflejada tiene un cambio de fase, produciendo ondas estacionarias, mientras que la transmitida no tiene cambio de fase.

Un cambio de fase es el efecto procedente de la reflexión, en donde se invierte la onda reflejada ( $180^\circ$ ) sobre la onda incidente de tal forma, que la interfiere constructivamente.

La velocidad ultrasónica como una función del tiempo mostró alteraciones a lo largo de la experimentación durante 30 min, tomando en cuenta que la distancia recorrida para la propagación de la onda fue de 0.03 m. Dichas alteraciones se deben a la interacción de las ondas con la materia a través de la absorción y/o mecanismos de dispersión (McClements, 2005), como se observa en la Figura 22.

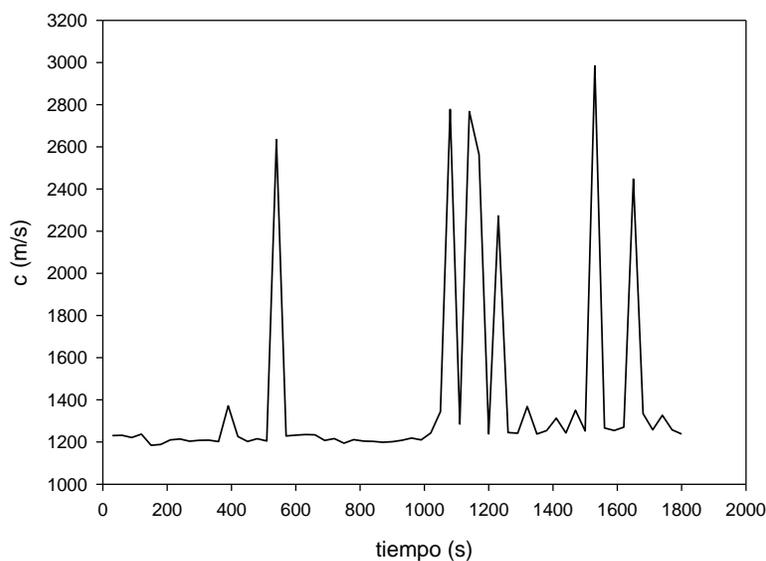


Figura 23: Velocidad ultrasónica durante 30 min

En lo que respecta al coeficiente de atenuación ( $\alpha$ ), presentó un decremento del minuto 10 al minuto 30 de 16.77 dB/m, ocasionado por los cambios físicos o químicos en el betabel, debido a que los alimentos, incluyendo frutas y hortalizas son altamente atenuantes ocasionado por la dispersión de la onda en sus poros o fibras (McClements & Gunasekaran, 1997; Povey, 1998). La atenuación es más importante conforme aumenta la temperatura, la frecuencia de la onda y el tiempo, debido al incremento del coeficiente de atenuación ( $\alpha$ ) (Mason & Lorimer, 2002),

corroborándolo a los 10 min como se observa en el cuadro 7, consecuencia de la reflexión de la onda durante su propagación, o como resultado de la conversión de una parte de la energía cinética de la onda en calor, causada por la pérdida de energía en la compresión y descompresión en las ondas ultrasónicas debido a la absorción (Buckin et al., 2002), y afectada por los efectos de adsorción.

### 3.4 SECADO INFRARROJO

#### 3.4.1 PARAMETROS FISICOS Y QUIMICOS

Los resultados obtenidos indican que existe una relación entre el tiempo y la temperatura del proceso de secado, los cuales se vieron afectados drásticamente por el pretratamiento y por lo tanto, las propiedades físicas y químicas sufren alteraciones notorias.

Cuadro 8: Características físicas y químicas del betabel al finalizar el secado sin/con pretratamiento.

Secado Infrarrojo						
Parámetros	Sin Pretratamiento		Con Pretratamiento			
	65°C	80°C	65°C		80°C	
			10 min	30 min	10 min	30 min
°Brix	11.7±0.12	12.6±0.20	17.9±0.38	13.5±3.54	16.9±2.73	18.9±0.10
L*	45.80±2.48	43.5±2.88	52.2±9.10	47.8±10.17	56.5±6.64	54.6±2.60
a*	29.3±6.68	28.9±5.53	14.4±3.84	21.2±0.11	13.4±0.35	18.8±2.5
b*	15.96±0.11	11.2±1.29	5.1±1.26	5.1±0.57	5.2±0.7	5.7±0.41
ΔE	33±7.28	31.02±4.83	28.30±3.45	18.10±4.93	28.7±1.52	29.8±2.5

La energía infrarroja causó un rápido aumento en la temperatura, lo que resulta en el aumento de los sólidos solubles con pretratamiento con respecto a las muestras sin pretratamiento, como se observa en el cuadro 8. Atungulu & Pan (2011) hacen referencia en que la radiación infrarroja incide en la superficie del alimento provocando cambios en las propiedades físicas y químicas, dependiendo de los componentes del alimento, entonces si la humedad se ve afectada también los otros componentes, como los sólidos solubles y el color. Por otro lado, Ginzberg (1969) demostró que el espesor mientras más delgado sea en el alimento, como en este caso, es preferible para procesos que emplean secado infrarrojo, ya que la alta transmisión de energía calórica dará mayor calentamiento, lo cual afecta a los °Brix.

Los resultados presentan diferentes variaciones con respecto a la temperatura del secado y tiempo de pretratamiento en los sólidos solubles. Sin embargo para determinar cuál de las dos variables manejadas afectó en mayor proporción, se empleó un análisis ANOVA de dos vías, presentando los resultados con un diagrama de caja en la Figura 23, encontrando que no hay interacción entre las variables y que el tiempo presentó un efecto significativo, con un efecto proporcional a 80°C. Durante el pretratamiento hubo una diferencia en los sólidos solubles de 4.4 a una temperatura de 65°C, mientras que a 80°C fue la diferencia de 2. Se observó que las muestras tratadas en un tiempo prolongado de pretratamiento y a una baja temperatura (65°C con 30 min), el efecto del ultrasonido generó cambios contradictorios en las propiedades físicas y químicas.

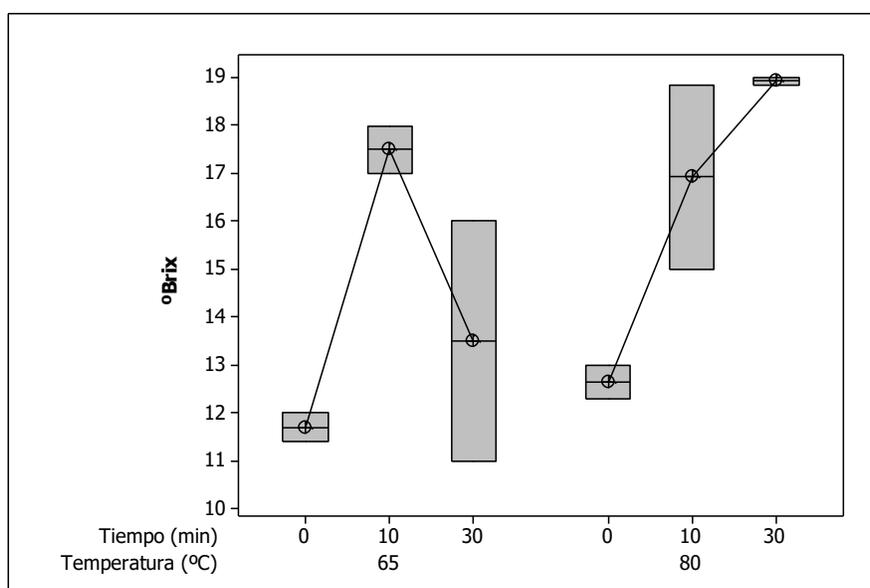


Figura 24: Diagrama de caja para °Brix con/sin pretratamiento

El color del betabel está influenciado principalmente por el contenido del colorante natural y su estructura química. La degradación de las betalaínas involucra a factores como la temperatura y pH, disminuyendo su actividad antioxidante y causando la formación del ácido betalámico. Una degradación posterior da como resultado pigmentos oscuros (Sánchez, 2006). Se puede observar en el cuadro 8, que el pretratamiento en el betabel contribuyó a un importante cambio en su color al finalizar el secado infrarrojo, presentando una reducción considerable con respecto a las muestras sin ultrasonido, en donde el betabel deshidratado se caracterizó por un color más claro, menos rojo y también menos violeta (Figura 24), debido a que el fenómeno de formación de microjets genera una fuerza impulsora extra que puede provocar la formación de radicales libres (Soria & Villamiel, 2010).

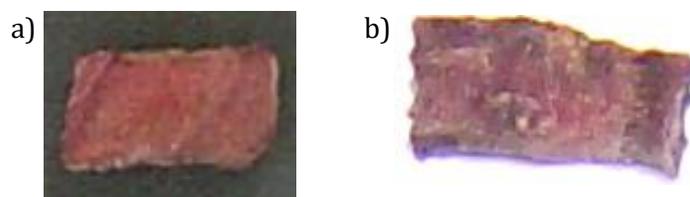


Figura 25: Fotografías del cambio de color después del secado infrarrojo  
a) Sin pretratamiento b) Con pretratamiento

Los valores de  $L^*$  son mayores al final del secado, probablemente se deba al método de imagen digital, que se basa en la medición de la luz reflejada desde la superficie, debido a que contienen menos humedad y por lo tanto la luz se refleja de manera diferente desde la superficie y las paredes. El pretratamiento dio como resultado la disminución y alteración de los parámetros  $a^*$  y  $b^*$ . Se obtuvieron resultados similares por Abano, Sam-Amoah & Bart-Plange (2012), observando un aumento en la luminosidad en muestras secas de zanahoria y la disminución en los parámetros  $a^*$  y  $b^*$ . Al igual que Malgorzata & Malgorzata (2015) durante un tratamiento ultrasónico a diferentes frecuencias y tiempos.

La diferencia de color en las muestras tratadas con/sin ultrasonido presentó cambios notorios. Según Tiwari et al. (2010), el dato total de la diferencia de color mayor que 2 es una diferencia visible. La mayoría de las muestras en estado seco con pretratamiento, presentaron datos similares de la  $\Delta E$ , en un intervalo de 28.3-29.8 a excepción de 65°C con 30 min, en donde se corrobora que a ciertas condiciones el secado infrarrojo es poco perjudicial con respecto al color, mostrando una reducción del parámetro  $a^*$  en comparación con las muestras sin pretratamiento, las cuales tienen mejor retención del color.

Además, el secado infrarrojo tuvo un gran impacto en el color en las muestras sin pretratamiento, las cuales se caracterizaron con un aumento de 3.08 en los datos de  $\Delta E$ , en comparación con las muestras con pretratamiento. El efecto de la temperatura sobre los antioxidantes naturales del betabel durante el proceso de secado es, obviamente, considerable, reduciendo la eficiencia antioxidante por descomposición térmica.

### 3.4.2 COMPORTAMIENTO DE LA HUMEDAD

En el proceso de secado infrarrojo se remueve humedad libre de la superficie y también agua retenida en el interior. La cantidad de agua evaporada como una función del tiempo decae en el

betabel con/ sin pretratamiento, debido a que el cambio de humedad depende de la transferencia de masa y calor.

Las Figuras 26 y 27 representan la cinética de secado sin pretratamiento, mientras que, las figuras 28-31 muestran la cinética de secado con pretratamiento a las dos diferentes temperaturas analizadas, cada una de las graficas se ajustaron a un modelo de tipo exponencial, lo cual esta de acuerdo a lo reportado para diferentes productos por Chrastil, 1989. Asimismo, se observó en las curvas las dos periodos de secado: de velocidad constante y velocidad decreciente, las cuales se diferencian perfectamente. Para determinar el valor del contenido de humedad critica, los dos periodos de secado observados han sido ajustados a lineas rectas tal como se muestra en las figuras 25-30.

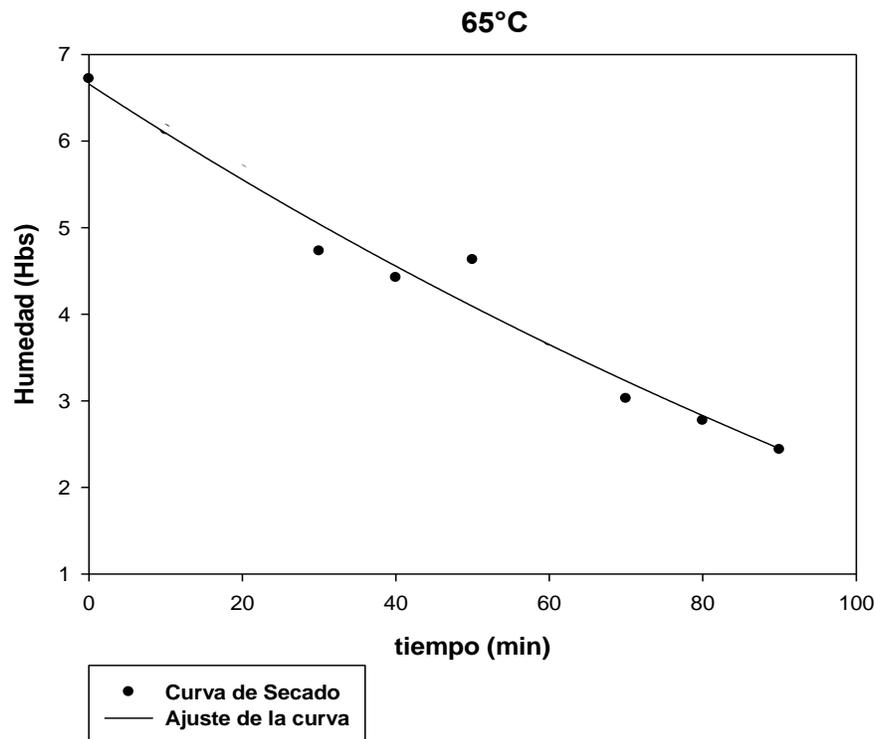


Figura 26: Cinética de secado del betabel sin pretratamiento a 65°C

En la curva de la figura 26 a 65°C, puede observarse la pérdida de humedad contenida en el betabel conforme se incrementa el tiempo de exposición del secado infrarrojo, en donde presentó un periodo de velocidad constante de 20.74 min aproximadamente con una humedad critica de

5.54 Hbs, mientras que en el periodo de velocidad decreciente llegó a un contenido de humedad de 2.4  $\text{g}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{s.s}}$  y un porcentaje final de humedad de 31.56.

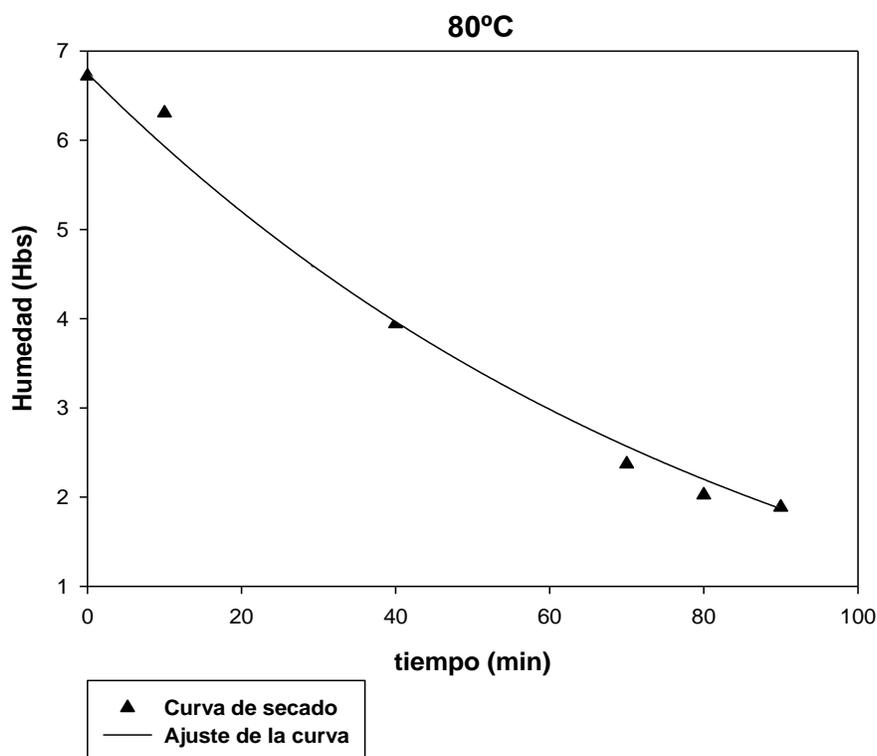


Figura 27: Cinética de secado del betabel sin pretratamiento a 80°C

De igual manera, en la curva de la figura 27 a 80°C, el periodo de secado a velocidad constante tuvo una duración de 42.5 minutos aproximadamente con una humedad crítica de 3.9  $\text{g}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{s.s}}$ . El periodo a velocidad decreciente, donde se desarrolló la mayor parte del secado infrarrojo, presentó una duración de 47.5 minutos llegando a un contenido de humedad de 1.88  $\text{g}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{s.s}}$ , con un porcentaje final de humedad de 24.4. Esto se atribuye, a que el secado es directamente proporcional a la cantidad aplicada de infrarrojo, entonces el aumento de la energía infrarroja podría haber causado un rápido aumento de la temperatura a la superficie del producto, lo que resulta en un aumento de la presión de vapor de agua en el interior del alimento y, por lo tanto, aumenta la tasa de secado. Resultados similares obtuvieron Sharma, Verma, & Pathare (2005).

La diferencia de temperaturas durante el secado infrarrojo, destaca la rapidez del calentamiento desde el interior del alimento, por lo cual no se forma costra en la superficie, acentuando la difusión del betabel en tiempo, esto quiere decir que, 65°C presentó mayor resistencia a la

migración de humedad con una diferencia de 7.1% en comparación con el porcentaje final de humedad de 80°C.

Por otra parte, analizando las curvas de secado en las figuras 28 y 29 a 65°C con pretratamiento, se observa que con 10 min el periodo de velocidad constante fue de 28.83 min aproximadamente con una humedad crítica de 4.66  $\text{g}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{s.s.}}$ , mientras que con 30 min fue de 24.96 min aproximadamente con una humedad crítica de 4.92  $\text{g}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{s.s.}}$ . Durante el periodo de velocidad decreciente, con 10 min de pretratamiento llegó a un contenido de humedad de 1.72  $\text{g}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{s.s.}}$  y un porcentaje final de humedad de 22.36, mientras que con 30 min fue de 2.16  $\text{g}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{s.s.}}$  y un porcentaje final de humedad de 28. A partir de lo anterior se deduce que fueron influenciadas por el tiempo de pretratamiento debido a que redujo el porcentaje final de humedad un 9.2% en comparación al resultado obtenido sin pretratamiento.

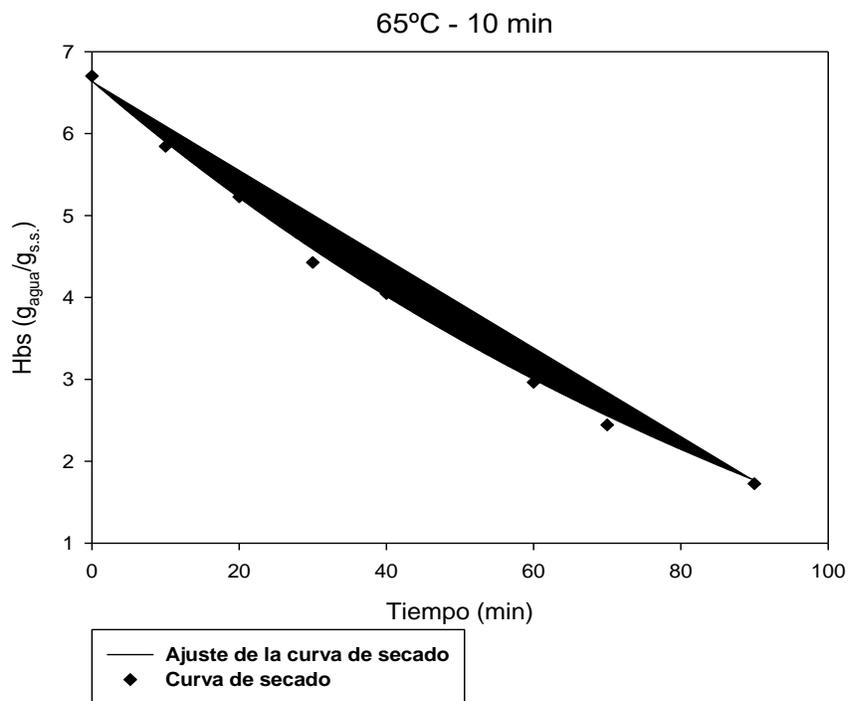


Figura 28: Cinética de secado del betabel con pretratamiento de 10 min

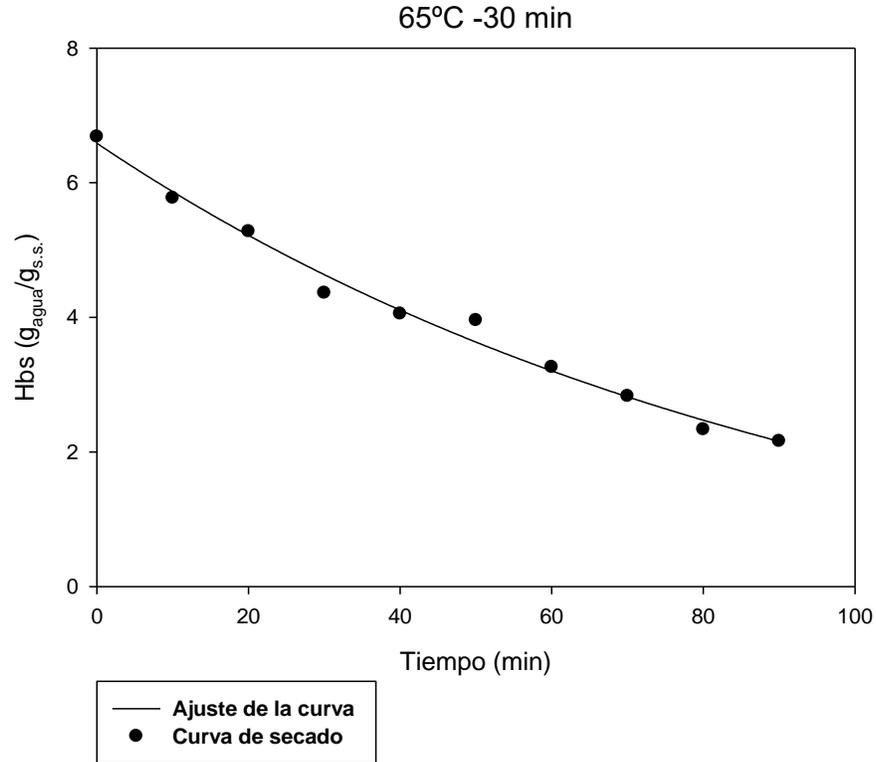


Figura 29: Cinética de secado del betabel con pretratamiento de 30 min

Por consiguiente, en las figuras 30 y 31 a 80°C con pretratamiento, se observa que a 10 min en el periodo de velocidad constante se llegó a una humedad crítica de 4.40 g<sub>agua</sub>/g<sub>s.s.</sub> en 20.04 min aproximadamente, mientras que a 30 min se llegó a 4.36 g<sub>agua</sub>/g<sub>s.s.</sub> en 24.26 min aproximadamente. Durante el periodo de velocidad decreciente con 10 min se obtuvo un porcentaje final de humedad de 14.60 con un contenido de humedad de 1.12 g<sub>agua</sub>/g<sub>s.s.</sub>, mientras que con 30 min se obtuvo 15.05% de humedad final con 1.16 g<sub>agua</sub>/g<sub>s.s.</sub>

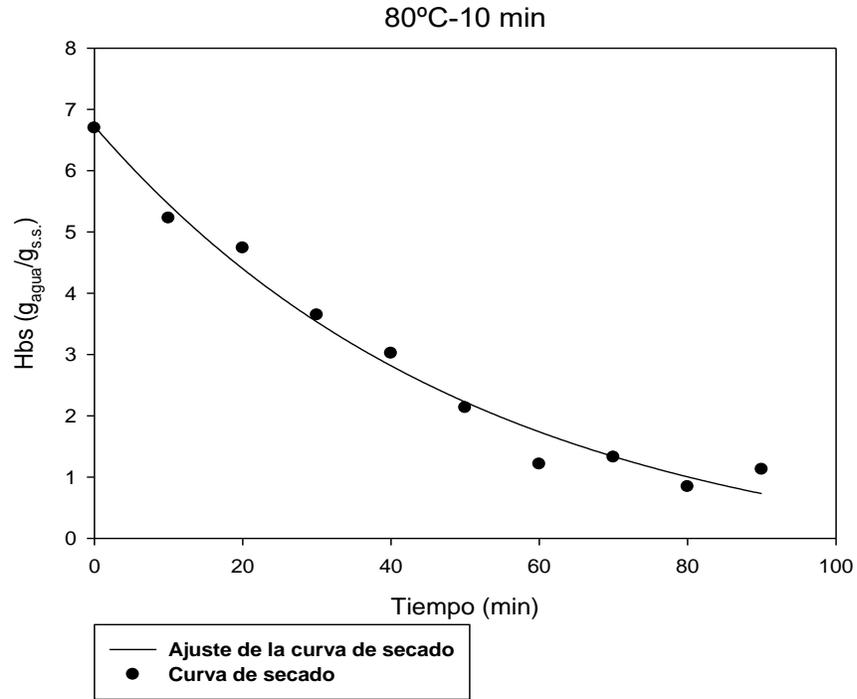


Figura 30: Cinética de secado del betabel con pretratamiento a 80°C

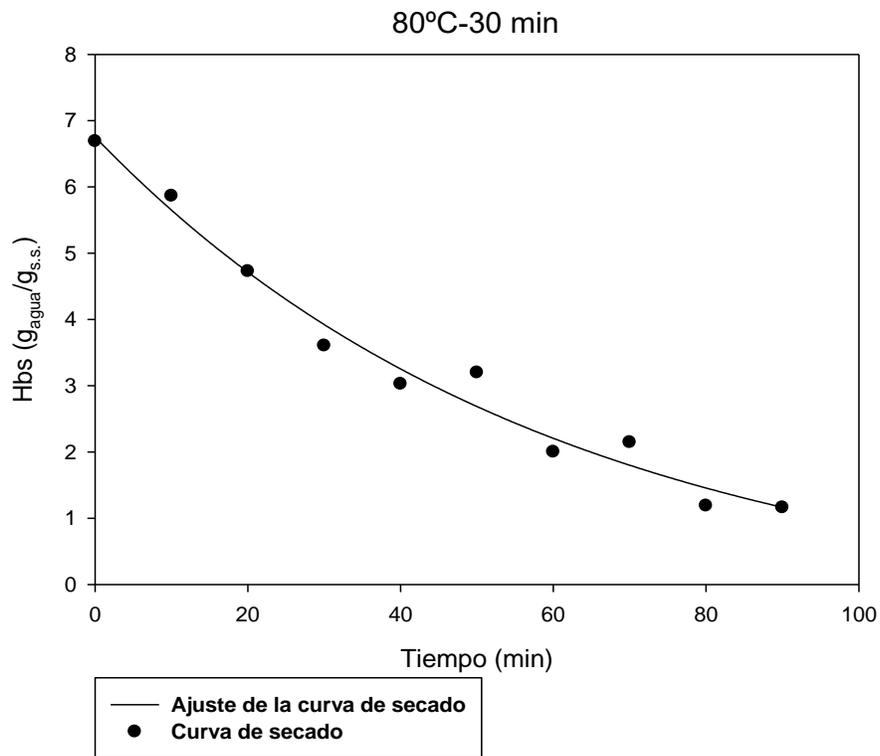


Figura 31: Cinética de secado del betabel con pretratamiento de 30 min

En lo que respecta al uso de ultrasonido con pretratamiento, la aceleración del periodo de velocidad constante a 65°C y 80°C, provocó que las diferencias en el contenido de humedad estén en un intervalo de 20-29 min, en donde influye la interacción de la temperatura del secado infrarrojo y tiempo de pretratamiento, resultando que la mayor temperatura con el menor tiempo de pretratamiento, es de 20 min con una humedad final de 14.57%. Los resultados descritos validan lo que De la Fuente Blanco, Riera-Franco & Gallego (2003) dicen, en donde las vibraciones ultrasónicas de elevada intensidad aceleran la cinética del proceso de deshidratación de vegetales al incrementar la transferencia del líquido desde el interior hacia la superficie exterior del material, debido a la estructura del betabel. Al igual que Fernandes & Rodrigues (2011) en un estudio, en donde el ultrasonido mostro tener una mayor influencia en los alimentos con alto contenido de agua y alto contenido de fibra.

### 3.4.3 DIFUSIÓN EFECTIVA

En el cuadro 9 se observa que los valores promedio de difusión efectiva con/sin pretratamiento, no presentan diferencias con respecto al valor de  $D_{efw}$  de  $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , a pesar de que tienen diferente temperatura, indicando que el valor está en el intervalo general de  $10^{-8}$  a  $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  para el secado de los materiales alimenticios, según Zogzas, Maroulis & Marinos-Kouris (1996); esto probablemente se deba a una mayor movilidad de sólidos, debido a su estructura, lo que genera el flujo de agua a través de las células. Al igual que Fernandes, Oliveira, & Rodrigues, (2007b) empleó un tratamiento ultrasonico por medio de inmersión en agua destilada durante 10 y 30 min, reportando valores de  $D_{efw}$  de  $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Cuadro 9: Valores promedio de la difusión efectiva del betabel

$D_{efw}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )			
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Sin Pretratamiento	Con Pretratamiento	
		10 min	30 min
65	$4.56 \times 10^{-9}$	$5.06 \times 10^{-9}$	$2.53 \times 10^{-9}$
80	$4.05 \times 10^{-9}$	$3.55 \times 10^{-9}$	$3.04 \times 10^{-9}$

En lo que corresponde a la difusión efectiva sin pretratamiento, puede observarse que aumentando la temperatura del secado infrarrojo, los valores de  $D_{efw}$  aumentan. Esta tendencia fue descrita por la relación de Arrhenius y concuerda con los resultados obtenidos por Giraldo-Zuniga, et al. (2010) en el secado de pulpa de cupuaçu. Otros estudios que también obtienen esta relación entre la temperatura y la difusión efectiva, son los realizados por Schmalcko & Alzamora (2005) al deshidratar yerba mate, en donde se concluyó que la humedad inicial también influye; Corzo, Bracho, Pereira, & Vásquez (2008), al aplicar el proceso de secado en laminas de coroba y Faustino, Barroca, & Guiné (2007) al secar pimientos verdes.

El ultrasonido como pretratamiento propició la disminución de la difusión efectiva durante el secado infrarrojo en comparación a los resultados obtenidos sin pretratamiento, a excepción de  $65^{\circ}\text{C}$  con 10 min, en donde probablemente la intensidad del pretratamiento provocó el efecto “esponja” en el betabel, el cual comprime y libera las células de la hortaliza que inducen en la aparición de canales microscópicos, los cuales son responsables del aumento de la difusividad efectiva del agua en el alimento durante el proceso de secado, favoreciendo la transferencia de

masa. Al igual que el mecanismo hidrodinámico (HDM) se relaciona con la estructura del alimento (porosidad) y aumenta el área de contacto interfacial, causando una cinética.

### 3.4.4 CINÉTICA DE LA TRANSFERENCIA DE MASA

El modelo de Azuara et al. (1992) evita las limitaciones del modelo de difusión de Fick en casos prácticos, el cual se ha considerado aceptable para predecir la transferencia de masa en la deshidratación osmótica en alimentos, con una escasa información disponible sobre la aplicación en el secado infrarrojo, por tal motivo se presentan a continuación los resultados obtenidos a diferentes temperaturas con/sin pretratamiento.

Después de que transcurrieran los primeros 20 min, se observó un comportamiento constante (cuadro 10), debido a la deformación de la estructura sólida del betabel. El  $D_{efw}$  a 65°C disminuyó paulatinamente con una diferencia promedio de 0.51. Por otro lado, a una temperatura de 80°C y conforme transcurre el tiempo presentó una disminución generalizada, indicando que la transferencia de masa se llevó a cabo a una velocidad superior, en comparación con 65°C.

Cuadro 10: Difusividad efectiva a cada tiempo del secado infrarrojo sin pretratamiento.

$D_{efw}$ (m <sup>2</sup> /s)		
Tiempo (min)	65°C	80°C
30	9.206X10 <sup>-08</sup>	7.738X10 <sup>-07</sup>
40	8.569X10 <sup>-08</sup>	7.374X10 <sup>-07</sup>
50	8.014X10 <sup>-08</sup>	7.042X10 <sup>-07</sup>
60	7.527X10 <sup>-08</sup>	6.739X10 <sup>-07</sup>
70	7.096X10 <sup>-08</sup>	6.461X10 <sup>-07</sup>
80	6.711X10 <sup>-08</sup>	6.206X10 <sup>-07</sup>
90	6.366X10 <sup>-08</sup>	5.969X10 <sup>-07</sup>

Se observa en la Figura 32 como disminuyen los coeficientes puntuales de  $D_{efw}$  con respecto al tiempo, debido a que se ven afectados por la interacción del pretratamiento y el secado infrarrojo en la estructura y componentes del betabel.

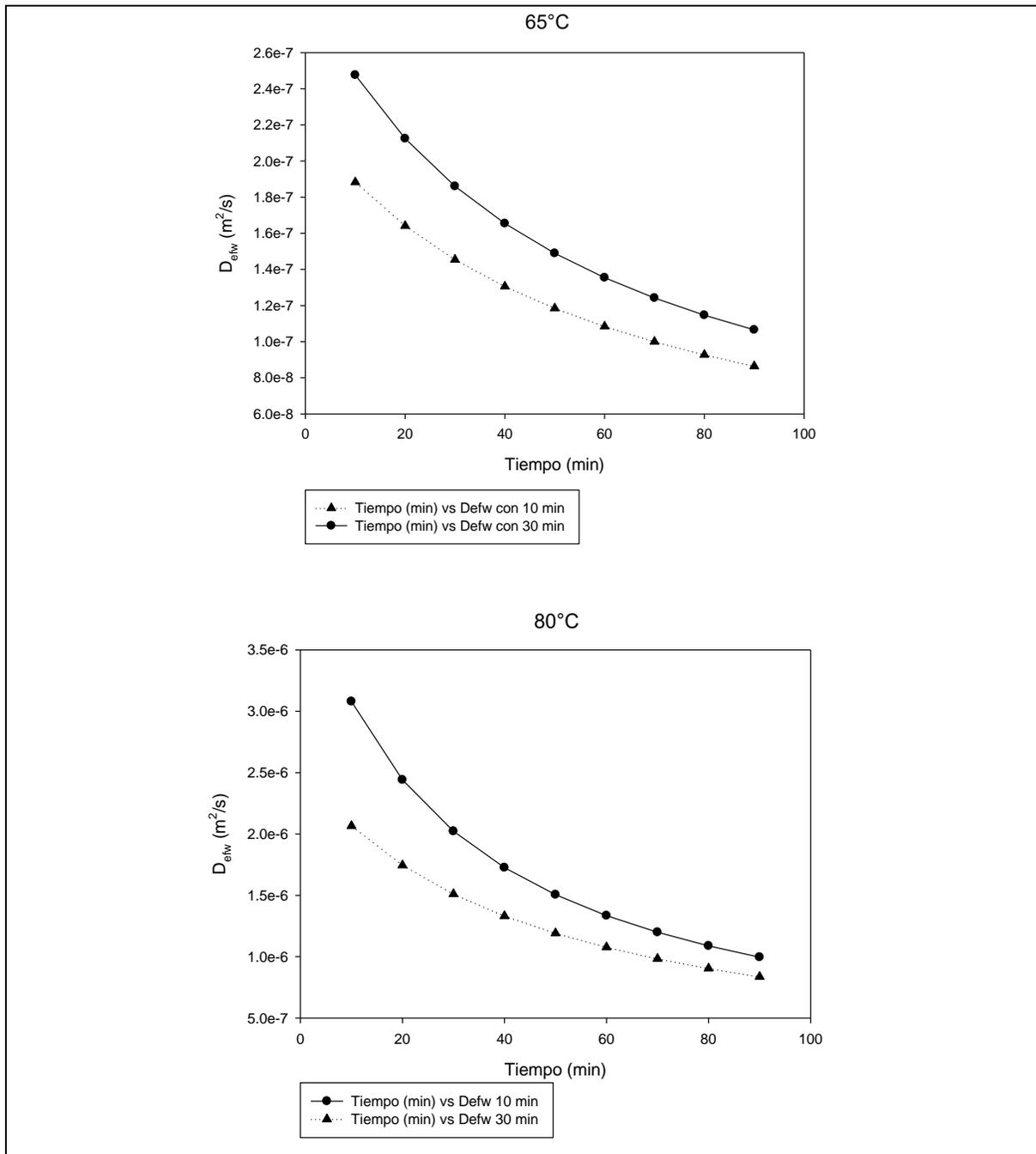


Figura 32: Difusión efectiva puntual empleando el modelo de Azuara con pretratamiento

## CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se determinó que el estudio fue concluido satisfactoriamente cumpliendo con los objetivos propuestos.

En el Objetivo 1 se determinó que al emplear el ultrasonido como pretratamiento presentó la disminución de °Brix ya que se generó una reducción casi del 25%, teniendo el menor valor en un mayor tiempo de exposición. Por la parte de color, el uso del ultrasonido provocó una pérdida del color con la disminución de los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  y en un menor tiempo de exposición la disminución fuera muy notoria. En lo que respecta a los parámetros ultrasónicos, propiciaron una influencia en las propiedades físicas y químicas del betabel, de tal manera que una mayor velocidad de propagación en un menor tiempo de pretratamiento dan una pérdida en el color, mientras que una mayor velocidad de propagación en un mayor tiempo de pretratamiento disminuyen los °Brix.

En el Objetivo 2 se determinó que la difusividad efectiva aumenta a una mayor temperatura de secado en un mayor tiempo de pretratamiento. La mayor pérdida de humedad se generó a una mayor temperatura en un menor tiempo de pretratamiento.

Basándonos en los resultados de los objetivos planteados, se concluye que el pretratamiento provocó beneficios en las propiedades evaluadas en el betabel, además de que los resultados obtenidos son relevantes, debido a la insuficiente información de los tratamientos empleados en cuestión de transferencia de masa.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Abano, E., Sam-Amoah, L., & Bart-Plange, A. (2012). Variation in Ultrasonic Frequency and Time as Pre-treatments to Air-Drying of Carrot. *Journal Agriculture Engineering*, 43, 149-158.
- AOAC. (1990). *Moisture in dried fruits. In Official methods of analysis (16th edition)*. Washigton, USA: Association of Official Analytical Chemists.
- Aristeo, P. (1998). Reguladores del Crecimiento XIV: Efecto del ácido salicílico (AS) y dimetilsulfoxido (DMSO), en el crecimiento de zanahoria, betabel y rabano. (Tesis). *Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autonoma de México*, 8-9. México.
- Aro, A., Pietinen, P., Valsta, L. M., Turpeinen, A. M., Ehnholm, C., Dougherty, R. M., & lacono, J. M. (1998). TransFatty Acids in French Fries, Soups, and Snacks from 14 European Countries: The TRANSFAIR Study. *Journal of Food Composition and Analysis*, 11, 170-177.
- Atungulu, G., & Pan, Z. (2011). Infrared Radiative Properties of Food Materials. En Z. Pan, & G. G. Atungulu (Edits.), *Infrared Heating for Food and Agricultural Processing* (págs. 27-32;284). United States: CRC Press;Taylor & Francis Group.
- Awad, T., Moharram, H., Shaltout, O., Asker, D., & Yussef, M. (2 de Mayo de 2012). Applications of Ultrasound in Analysis, Processing and Quality Control of Food: A review. *Food Research International*, 48, 410-427.
- Azuara, E., Cortés, R., Garcia, H. S., & Beristain, C. I. (1992). Kinetic Model for Osmotic Dehydration and its Relationship with Fick's Second Law. *International Journal of Food Science and Technology*(27), 409-418.
- Azuola, R. Y., & Vargas, P. (2007). Extracción de Sustancias Asistidas por Ultrasonido. *Tecnología en Marcha*, 20(4), 30-40.
- Badui Dergal, S. (2006). *Química de los Alimentos*. México: Pearson Addison Wesley.
- Bamberger, J., & Greenwood, M. (2004). Non-Invasive Characterization of Fluid Foodstuffs Based on Ultrasonic Measurements. *Food Research International*, 37, 621-625.
- Benedito, J. (1998). *Contribución a la Caracterización de Quesos Mediante el Uso de Ultrasonidos de Señal*. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Borisov, Y., Gynkina, N., & Rozenberg Ed., L. (1973). *Acoustic drying. En Physical principles of ultrasonic technology*. New York, EEUU: Plenum Press.
- Boudhrioua, N., Bahloul, N., Ben Slimen, I., & Kechaou, N. (2009). Comparison on the Total Phenol Contents and the Color of Fresh and Infrared Dried Olive Leaves. *Industrial Crops and Products*, 29, 412-419.
- Buckin, W., Kudryushov, E., & O'Driscoll, B. (2002). High-Resolution Ultrasonic Spectroscopy for Material Analysis. *American Laboratory*, 28-31.
- Camarena, F., & Martinez-Mora, J. (2006). Potential of Ultrasound to Evaluate Turgidity and Hydration of the Orange Peel. *Journal of Food Engineering*, 75, 503-507.
- Camarena, F., Martínez-Mora, J., & Ardid, M. (2007). Ultrasonic Study of the Complete Dehydration Process of Orange Peel. *Postharvest Biology and Technology*, 43, 115-120.
- Camire, M., Chaovanalikit, M., Dougherty, J., & Briggs. (2002). Blueberry and Grape Anthocyanins as Breakfast Cereal Colorants. *Journal Food Science*(67), 438-441.
- Cárcel. (2003). *Influencia de los Ultrasonidos de Potencia en Procesos de Transferencia de Material*. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Tecnología de Alimentos., Valencia, España.

- Cárcel, J., Benedito, J., Bon, J., & Mulet, A. (2007c). High Intensity Ultrasound Effects on Meat Brining. *Meat Science*(76), 611-619.
- Cárcel, J., Benedito, J., Rosselló, C., & Mulet, A. (2007b). Influence of Ultrasound Intensity on Mass Transfer in Apple Immersed in a Sucrose Solution. *Journal of Food Engineering*(78), 472-479.
- Cárcel, J., García-Pérez, J., Benedito, J., & Mulet, A. (2012). Food Process Innovation Through New Technologies: Use of Ultrasound. *Journal of Food Engineering*(110), 200-207.
- Carlin, B. (1972). *Ultrasonica*. Bilbao, España: URMO.
- Carrero, P. (2010). *Diseño de un Sistema Electro-Mecánico para el Secado de Productos por Ultrasonido*. (Proyecto Fin de Carrera), Universidad Pontificia Comillas, Madrid.
- Cen, H., & He, Y. (2007). Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality. *Trends in Food Science Technology*, 18, 72-83.
- Chemat, F., Zill-e-Huma, & Khan, M. K. (2011). Applications of Ultrasound in Food Technology. Processing, Preservation and Extraction. *Ultrasonic Sonochemistry*, 18, 813-835.
- Chendke, P., & Fogler, H. (1975). Macrosonics in Industry. Part 4: Chemical Processing. *Ultrasonics*, 13, 31-37.
- Chou, S., & Chua, K. (2001). New Hybrid Drying Technologies for Heat Sensitive Foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology*(12), 359-369.
- Chrastil, J. (1989). Quantitation of Water Absorption, Swelling and Drying of Biological Materials. Soaking of rice and Soaking and Drying of Wood. *Journal Agriculture Food Chemistry*, 37, 965-968.
- Corzo, O., Bracho, N., Pereira, A., & Vásquez, A. (2008). Weibull Distribution for Modeling Air Drying of Coroba Slices. *Food Science and Technology*, 41, 2023-2028.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion* (2nd ed.). London: Clarendon Press.
- Cruz, B. (2008). *Cambios en Piña y Manzana Durante el Proceso de Deshidratación Osmótica*. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán-UNAM, Cuautitlán Izcalli, Edo. de México.
- Cubero, N., Monferrer, A., & Villalta, J. (2002). *Tecnología de Alimentos: Aditivos Alimentarios*. Madrid: Mundi-Prensa.
- De la Fuente Blanco, S., Riera-Franco, E., & Gallego, J. (2003). Estudio de los Parámetros Involucrados en el Proceso de Deshidratación Ultrasonica de Vegetales. *Revista de Acústica*, 35, 30.
- De la Fuente, S., Riera-Franco, E., Acosta-Aparicio, V., Blanco, A., & Gallego, J. (2006). Food Drying Process by Power Ultrasound. *Ultrasonic*, 44, 523-527.
- Elvira, L. (2000). Medida de la Velocidad de Propagación en Líquidos en el Rango de las Bajas Frecuencias Ultrasonicas. *Tecni Acustica*, 5.
- Espín, J. C. (2002). Anthocyanin-Based Natural Colorants: A new source of Antiradical Activity for Foodstuff. *Journal Agriculture Food Chemistry*(48), 1588-1592.
- Espinoza, J. L. (2011). *Aplicación de un Proceso de Secado Asistido Infrarrojo para la Deshidratación del Fruto de Murtilla (Ugni Molinae Turcz)*. (Tesis).Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas., Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química, Santiago, Chile.

- Farid, C., Zill-e-, H., & Muhammed Kamran, K. (16 de Diciembre de 2010). Applications of Ultrasound in Food Technology: Processing, Preservation and Extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18, 813-835.
- Faustino, J., Barroca, M., & Guiné, R. (2007). Study of the Drying Kinetics of Green Bell Pepper and Chemical Characterization. *Food and Bioproducts Processing*, 85, 163-170.
- Fennema, O. R. (1993). *Química de los Alimentos*. Acribia S.A.
- Fernandes, F., & Rodrigues, S. (2007a). Ultrasound as Pretreatment for Drying of Fruits: Dehydration of Banana. *Journal of Food Engineering*(82), 261-267.
- Fernandes, F., & Rodrigues, S. (2011). Ultrasound Application as Pre-treatment for Drying of Fruits. *Proceedings of the International Congress on Engineering and Food* (págs. 1987-1989). Athens, Greece: In P.S. Taoukis et al.
- Fernandes, F., Oliveira, F., & Rodrigues, S. (2007b). Use of Ultrasound for Dehydration of Papayas. *Food Bioprocess Technology*, 1, 339-345.
- Fernandes, F., Rodrigues, S., Gaspareto, O., & Oliveira, E. (2006). Optimization of osmotic dehydration of papaya followed by air-drying. *Food Research International*(39), 492-498.
- Fernández García, A., Butz, P., & Tauscher, B. (2001). Effects of High-pressure Processing on Carotenoid Extractability, Antioxidant Activity, Glucose Diffusion and Water Binding of Tomato Puree (*Lycopersicon esculentum*). *Journal Food Science*(66), 1033-1038.
- Fito, P., Andrés, A., Barat, J., & Albors, A. (2001). *Introducción al Secado de Alimentos por Aire Caliente*. Valencia: U.P.V.
- Flores, E. (2014). *Efecto de la congelación-cocción evaluado en atributos de calidad en carne de cerdo. (Tesis)*. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán Izcalli, Estado de México.
- Franco, A. (2000). *Física con Ordenador. Curso Intensivo de Física en Internet*. Obtenido de Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Eibar: [http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/teoria/A\\_Franco/default.htm](http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/teoria/A_Franco/default.htm)
- Franco, M. E. (2004). *Caracterización Parcial del Pigmento Rojo del Fruto de la Jiotilla (Escontria Chiotilla); una Cactácea Subexplotada*. (Tesis Maestría), Universidad Autónoma Metropolitana, México, D.F.
- Gallego-Juárez, J., Rodríguez-Corral, G., Gálvez-Moraleda, J., & Yang, T. (1999). A new high intensity ultrasonic technology for food dehydration. *Drying Technology*(17), 597-608.
- García, J. V. (2007). *Contribución al Estudio de la Aplicación de Ultrasonidos de Potencia en el Secado Convectivo de Alimentos*. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia., Tecnología de Alimentos., Valencia, España.
- García-Alvarez, J., Gómez, M., Rosell, C., Turó, A., Chávez, J., García-Hernández, M., & Salazar, J. (2010). Análisis de Masas Alimenticias Mediante Sensores Electrónicos de Ultrasonido: Aplicación al Estudio de Masas de Cereales. *AGROCSIC*, 43, 16-25.
- Ginzberg, A. (1969). *Application of Infrared Radiation in Food Processing*. London, England: Leonard Hill Books.
- Giraldo-Zuniga, A., Arévalo-Pinedo, A., Silva, A., Silva, P., Valdés-Serra, J., & Pavlak, M. (2010). Datos Experimentales de la Cinética del Secado y del Modelo Matemático para Pulpa de Cupuacu (*Theobroma Grandiflorum*). *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 30, 179-182.

- Gonzalez, G. (2005). Aplicación de Ultrasonido para la Estabilización de Sistemas Alimentarios. *En II: Congreso de Desarrollo Agroindustrial. Instituto Universitario de la Paz UNIPAZ*, (págs. 1-5). Barrancabermeja.
- Hayakawa, K.-I., & Furuta, T. (1988). Thermodynamically Interactive Heat and Mass Transfer Coupled with Shrinkage and Chemical Reaction. En R. P. Singh, & A. G. Medina (Edits.), *In Food Properties and Computer-Aided Engineering of Food-Processing System* (págs. 201-221). Kluwer Academic Pub., Dordrecht, Boston & London.
- Hebbbar, U., Vishwanatha, K., & Ramesh, M. (2004). Development of Combined Infrared and Hot Air Dryer for Vegetables. *Journal of Food Engineering*(65), 557-563.
- Herbach, K., Stintzing, F., Elss, S., Preston, C., Schreier, P., & Carle, R. (2006). Isotope Ratio Mass Spectrometrical Analysis of Betanin and Isobetanin Isolates for Authenticity Evaluation of Purple Pitaya-Based Products. *Food Chemistry*(99), 204-209.
- Hernando, E., & Pérez, M. (2009). *Aplicaciones de la Reflexión del Sonido. Ingeniería de las Ondas. Ingeniería de Telecomunicación. Universidad de Valladolid*. Obtenido de [http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_04\\_05/io9/public\\_html/index.html](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_04_05/io9/public_html/index.html)
- Huang, A., & Von Elbe, J. (1987). Effect of pH on the Degradation and Regeneration of Betanin. *Journal Food Science*(52), 1689-1693.
- ISO 12647-2. (2004). *Graphic Technology-Process Control for the Production of Half-Tone Colour Separations, Proof and Production Print. Part 2: Offset Lithographic Processes*. Obtenido de [http://www.sovsib.ru/color/iso12647\\_en.pdf](http://www.sovsib.ru/color/iso12647_en.pdf)
- Jackman, L., & Smith, L. (1992). Anthocyanins and Betalains. En G. Hendry, & J. Houghton (Edits.), *Natural Food Colorants* (pág. 192). Blackie and Son Ltd.
- Jambrak, A., Mason, T., Paniwnyk, L., & Lelas, V. (2007). Accelerated drying of button mushrooms, brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. *Journal of Food Engineering*(81), 88-97.
- Jiménez, T. (2007). Determinación del Contenido de Agua en Muestras de Especies y Granos de Café por Medio de la Extracción Asistida con Ultrasonido y la Detección con el Reactivo de Karl Fischer en Línea. *Tesis Maestría*. Ciudad de México. Obtenido de <http://132.248.9.195/pd2007/0615110/Index.html>
- John, N., & Stuart, C. (1990). Repeated Harvest of Vacuole-Located Secondary Product from In Vitro Grown Plant Cells Using 1.02 MHz Ultrasound. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 33, 448-451.
- Kirsten, M., Florian, C., & Stintzing and Reinhold, C. (2006). Betalain Stability and Degradation Structural and Chromatic Aspects. *Journal of Food Science*, 71 (4), 41-50.
- Knorr, D., Froehling, A., Jaeger, H., Reineke, K., Schlueter, O., & Schoessler, K. (2011). Emerging Technologies in Food Processing. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2, 203-235.
- Krejcová, A., Cernohorsky, T., & Meixner, D. (2007). Elemental Analysis of Instant Soups and Seasoning Mixtures by ICP-OES. *Food Chemistry*, 105, 242-247.
- Krishnamurthy, K., Jun, S., Irudayaraj, J., & Demirci, A. (2011). Infrared Radiation Heating for Food Safety Improvement. En Z. Pan, & G. G. Atungulu (Edits.), *Infrared Heating for Food and Agricultural Processing* (pág. 234). United States: CRC Press; Taylor & Francis Group.

- Kumar, D., Hebbar, U., Sukumar, D., & Ramesh, M. (2005). Infrared and Hot-Air Drying of Onions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 132-150.
- Kuttruff, H. (1991). *Ultrasonics: Fundamentals and Applications*. New York, NY: Elsevier.
- Latorre, M., Narvaiz, P., Rojas, A., & Gerschenson, L. (2010). Effects of Gamma Irradiation on Biochemical and Physico-chemical Parameters of Fresh-cut Red Beetroot. *Journal of Food Engineering*, 98, 178-191.
- Leighton, T. (1998). *The Principles of Cavitation*. Chapman & Hall, London: In: Povey, M.J.W., Mason T.J. (Eds), *Ultrasound in Food Processing*.
- Lewicki, P. (2006). Design of Hot Air Drying for Better Foods. *Trends in Food Science & Technology*, 17, 153-163.
- López, T. (1992). Estabilización de las Betacianinas de la Opuntia Robusta y Opuntia Streptacantha. *Tecnología Alimentaria*, 27, 44.
- Malgorzata, N., & Malgorzata, W. (2015). Effect of Ultrasound Treatment on Microstructure, Colour and Carotenoid Content in Fresh and Dried Carrot Tissue. *Applied Acoustics*, In press as.
- Manivannan, P., & Rajasimman, M. (2008). Osmotic Dehydration of Beetroot in Salt Solution: Optimization of Parameters through Statistical Experimental Design. *International Journal of Chemical and Biological Engineering*, 1, 214-221.
- Mapari, S., Nielsen, K., Larsen, T., Frisvad, J., Meyer, A., & Thrane, U. (2005). Exploring Fungal Biodiversity for the Production of Water-Soluble Pigments as Potential Natural Food Colorants. *Curr. Opin. Biotechnol*(16), 231-238.
- Mason, T. (1998). Power Ultrasound in Food Processing-The Way Forward. En J. Ridgway, K. Henthorn, J. Hull, D. Cartwright, M. Povey, B. Hoyle, ... T. Leighton, M. J. Povey, & T. J. Mason (Edits.), *Ultrasound in Food Processing* (págs. 103-126). Londres, Reino Unido: Blackie Academic & Professional.
- Mason, T., & Cordemans, E. (1996). Ultrasonic Intensification of Chemical Processing and Related Operations. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*(74), 511-516.
- Mason, T., & Lorimer, J. (2002). The Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing. *Applied Sonochemistry*.
- Mason, T., Paniwnyk, L., & Lorimer, J. (1996). The Uses of Ultrasound in Food Technology. *Ultrasonic Sonochemistry*, 3, 253-260.
- McClements. (2005). *Food Emulsions: Principles, Practices and Techniques*. Boca Raton, Florida: CRC PRESS.
- McClements, D. (1997). Ultrasonic Characterization of Food and Drinks: Principles, Methods and Applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 37, 1-46.
- McClements, J. D. (1995). Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. *Trends in Food Science Technology*, 6, 298.
- Mejía, C. C. (2012). *Evaluación de una Solución Osmótica a Base de Betabel (Beta Vulgaris L.) para la Impregnación de un Producto Endémico "Camote" (Ipomoea Batatas L.)*. Tesis de Licenciatura. Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense., Ingeniería en Biotecnología, Huejutla, Hidalgo.
- Modest, M. (1993). *Radiative Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill International Editions.

- Mujumdar, A. (2007). An Overview of Innovation in Industrial Drying: Current Status and R&D Needs. *Transport in Porous Media*, 66(1), 3-18.
- Mujumdar, A. S. (2006). Principles, Classification and Selection of Dryers. En *Handbook of Industrial Drying* (Third ed., págs. 4-31). CRC Press.
- Mulet, A. (1994). Drying Modelling and Water Diffusivity in Carrots and Potatoes. *Journal of Food Engineering*, 22, 329-348.
- Mulet, A., Benedito, J., Bon, J., & Rosselló, C. (1999c). Ultrasonic velocity in Cheddar cheese as affected by temperature. *Journal of Food Science*(64), 1038-1041.
- Mulet, A., Cárcel, J., Benedito, J., Rosselló, C., & Simal, S. (2003a). Ultrasonic Mass Transfer Enhancement in Food Processing. En *Transport Phenomena in Food Processing*. New York, EEUU: Welti-Chanes, J., Vélez-Ruiz, J., Barbosa-Canova, G., CRC Press,.
- Mulet, A., Cárcel, J., Sanjuán, N., & Bon, J. (2003b). New Food Drying Technologies-Use of Ultrasound. *Food Science Technology*, 9, 215-221.
- Muralidhara, H., Ensminger, D., & Putnam, A. (1985). Acoustic Dewatering and Drying (Low and High Frequency): State of the Art Review. *Drying Technology*, 3, 529-566.
- Nindo, C., & Mwithiga, G. (2011). Infrared Drying. En Z. Pan, & G. G. Atungulu (Edits.), *Infrared Heating for Food and Agricultural Processing* (págs. 89-97). United States: CRC Press; Taylor & Francis Group.
- Nowak, D., & Lewicki, P. (2004). Infrared Drying of Apple Slices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5, 353-360.
- O'Brien Jr., W. (2007). Ultrasound-Biophysics Mechanisms. *Progress in Biophysics & Molecular Biology*, 93, 212-255.
- Ortiz, A. M. (2007). Proyecto de Exportación de Betabel Orgánico Sinaloense Bajo el Concepto de Jugoterapia al Mercado Japones (Tesis). *Facultad de Estudios Superiores Acatlán, Universidad Nacional Autónoma de México*, 44-49. México.
- Parzanese, M. (2015). *Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Presidencia de la Nación. Obtenido de Tecnologías para la Industria Alimentaria-Ultrasonidos: [http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha\\_19\\_Ultrasonidos\\_Alimentos.pdf](http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_19_Ultrasonidos_Alimentos.pdf)*
- Patist, A., & Bates, D. (2008). Ultrasonic Innovations in the Food Industry: from the Laboratory to Commercial Production. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9, 147-154.
- Paz, M. (2015). *Uso del Ultrasonido como Pretratamiento en la Deshidratación Osmótica de Carne de Cerdo (Longissimus Thoracis).(Tesis)*. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan.Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán Izcalli, Estado de México.
- Pennet, S. (1991). New Application of Industrial Food Enzymology: Economics and Processes. *Food Technology*, 49, 79.
- Peshkovsky, A., & Peshkovsky, S. (2010). *Acoustic Cavitation Theory and Equipment Design Principles for Industrial Applications of High Intensity Ultrasound*. New York: Nova Science Publishers Inc.
- Pino, J., Cerezal, P., & Salabarría, Y. (1994). Estudio de la Estabilidad del Colorante de la Remolacha (Beta Vulgaris) en forma de Licor Concentrado. *Tecnología Alimentaria*, 29, 7-16.

- Povey, M. (1998). *Rapid determination for food materials properties. Ultrasound in Food Processing*. Londres, Reino Unido: Pover, M.J.W., Mason T.J., Capman&Hall.
- Puente, L., Castro, E., Echegaray, E., & Pinto, C. (s.f.). Mathematical Modeling of Infrared-Assisted Drying of Thin Layer Lemon Waste (Citrus Limon).
- Raj, B., Rajendran, V., & Palanichamy, P. (2004). Science and Technology of Ultrasonics. *Alpha Science International*.
- Raso, J., Mañas, P., Pagán, R., & Sala, F. (1999). Influence of Different Factors on the Output Power Transferred Into Medium by Ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 5, 157-162.
- Rastogi, N., & Raghavarao, K. (2004). Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Pineapple: Considering Fickian Diffusion in Cubical Configuration. *Lebensm-Wiss. u.-Technology*(37), 45.
- Rastogi, N., Raghavarao, K., Niranjana, K., & Knorr, D. (2002). Recent Developments in Osmotic Dehydration: Methods to Enhance Mass Transfer. *Trends in Food Science & Technology*, 13, 51-52.
- Recuero, M. (1995). *Ingeniería Acústica*. Madrid, España: Paraninfo.
- Riva, M. (2003). *Immagini & Computer*. Obtenido de [http://www.immaginiecomputer.it/allegati%5CStandard\\_colore.pdf](http://www.immaginiecomputer.it/allegati%5CStandard_colore.pdf)
- Rodrigues, S., & Fernandes, F. A. (2007). Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering*(82), 261-267.
- Rodriguez, M. (2002). *El color en los alimentos*. Diario de la Seguridad Alimentaria.
- SAGARPA. (2005). *Pliego de Condiciones para el Uso de la Marca Oficial México Calidad Suprema en Tuna*. PC-046. Obtenido de [http://www.mexicocalidadsuprema.org/assets/galeria/PC\\_046\\_2005\\_Tuna.pdf](http://www.mexicocalidadsuprema.org/assets/galeria/PC_046_2005_Tuna.pdf)
- SAGARPA. (2014). *Programa Integral de Desarrollo Rural 2014. Componente de Agricultura Familiar Periurbana y de Traspatio*. Asociación Nacional de Egresados de Chapingo. Obtenido de <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/distritofederal/Documents/AgriculturaF/BE TABEL.pdf>
- Saggin, R., & Coupland, J. (2001). Non-contact ultrasonic measurements in food materials. *Food Research International*, 34, 865-870.
- Saguy, I., Goldman, M., Bord, A., & Cohen, E. (1984). Effect of Oxygen Retained on Beet Powder on the Stability of Betanine and Vulgaxanthine I. *Journal of Food Science*, 49, 99-101.
- Sánchez, N. (2006). *Extracción y Caracterización de los Principales Pigmentos del Opuntia Joconostle c.v. (Xoconostle)*. Tesis Maestría. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, IPN, México, D.F.
- Santos, P., & Silva, M. (2009). Kinetics of L-ascorbic Degradation in Peneapple Drying Under Ethanol Atmosphere. *Drying Technology*, 27, 947-954.
- Schmalcko, M., & Alzamora, S. (2005). Modelling the Drying of a Twig of "Yerba Mate" Considering as a Composite Material Part II: Mathematical Model. *Journal of Food Engineering*, 67, 267-272.
- Sharma, G., Verma, R., & Pathare, P. (2005). Thin-Layer Infrared Radiation Drying of Onion Slices. *Journal of Food Engineering*, 67, 361-366.

- Sharma, S. K., Mulvaney, S. J., & Rizvi, S. S. (2003). *Ingeniería de Alimentos Operaciones Unitarias y Prácticas de Laboratorio*. Ithaca, Nueva York: Limusa Wiley.
- Shi, J., Pan, Z., McHugh, T., Wood, D., Hirschberg, E., & Olson, D. (2008). Drying and Quality Characteristics of Fresh and Sugar-Infused Blueberries Dried with Infrared Radiation Heating. *Food Science and Technology*, 41, 1962-1972.
- SIAP, S. (2014). *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Obtenido de <http://www.siap.gob.mx/betabel/>
- SISTENDCA. (2010). *Grupo Sistend Testing C.A., Sistemas y Ensayos, Curso de Ultrasonido Básico*. (B. González, Productor) Obtenido de Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela: <http://sistendca.com/DOCUMENTOS/Curso%20Ultrasonido%20Basico.pdf>
- Sivakumar, V., Lakshmi Anna, J., Vijayeeswaree, J., & Swaminathan, G. (2009). Ultrasound Assisted Enhancement in Natural Dye Extraction from Beetroot for Industrial Applications and Natural Dyeing of Leather. *Ultrasonic Sonochemistry*, 16(6), 782-789.
- Sivakumar, V., Vijaeeswarri, J., & Lakshmi, J. (2011). Effective Natural Dye Extraction from Different Plant Materials Using Ultrasound. *Industrial Crops and Products*, 33, 116-122.
- Soria, A., & Villamiel, M. (2010). Effect of Ultrasound on the Technological Properties and Bioactivity of Food. *Trends in Food Science & Technology*, 21, 323-331.
- Stintzing, F., & Carle, R. (2006). Cactus Fruits-More that Color. *Fruit Processing*(16), 166-171.
- Stintzing, F., & Carle, R. (2007). Betalains-Emerging Prospects for Food Scientists. *Trend in Food Science & Technology*, 18, 514-525.
- Suvarnakuta, P., Devahastin, S., & Mujumdar, A. (2005). Drying Kinetics and b-carotene Degradation in Carrot Undergoing Different Drying Processes. *Journal of Food Science*, 70(8), 520-526.
- Tektronix. (2012). *Manual del Usuario Series TDS2000C y TDS1000C-EDU. Osciloscopios de Almacenamiento Digital*. Obtenido de Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona : <https://weble.upc.edu/asig/EE/ManualTektronix.pdf>
- Teles, U., Fernandes, F., Rodrigues, S., Lima, A., Maia, G., & Figueiredo, R. (2006). Optimization of osmotic dehydration of melons followed by air-drying. *International Journal of Food Science and Technology*(41), 674-680.
- Timoumi, S., Mihoubi, D., & Zagrouba, F. (2007). Shrinkage, Vitamin C Degradation and Aroma Losses During Infrared Drying of Apple Slices . *Swiss Society of Food Science and Technology*, 1648-1654.
- Tiwari, B., Patras, A., Brunton, N., Cullen, P., & O'Donnell, C. (2010). Effect of Ultrasound Processing on Anthocyanins and Color of Red Grape Juice. *Ultrasonic Sonochemistry*, 17, 598-604.
- Tuncel, N., Yilmaz, N., Kocabiyik, H., Ozturk, N., & Tuncel, M. (2010). The Effects of Infrared and Hot Air Drying on Some Properties of Corn (Zea Mays). *Journal of Food Agriculture & Environment*, 8, 63-68.
- Valparaiso, P. U. (2007). *OPENCOURSEWARE PUCV*. Recuperado el 23 de Mayo de 2016, de <http://ocw.pucv.cl/cursos-1/fisioterapia-i/materiales-de-clases-1/catedras/06-ultrasonido-principios-terapeuticos>

- Váquiro, H. (2009). *Contribución al Estudio y Optimización del Secado Intermitente: Aplicación al Secado de Mango*. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. , Valencia, España.
- Venkatasubramanian, S., J., V., & J. Lakshmi, A. (2011). Effective Natural Dye Extraction from Different Plant Materials Using Ultrasound. *Industrial Crops and Products*(32), 116-122.
- Villegas, R. (1979). *Estudios de los Colorantes del Betabel*. (Tesis).Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México.
- Walde, S., Velu, V., Jyothirmayi, T., & Math, R. (2006). Effects of Pretreatments and Drying Methods on Dehydration of Mushroom. *Journal of Food Engineering*, 74, 108-115.
- Xue, K. (2004). *Optimización del Secado por Aire Caliente de Pera (Blanquilla)*. (Tesis Doctoral).Universidad Politecnica de Valencia. , Tecnología de Alimentos, Valencia, España.
- Yam, K. L., & Papadakis, S. E. (2004). A Simple Digital Imaging Method for Measuring and Analyzing Color of Food Surfaces. *Journal of Food Engineering*, 61, 137-142.
- Yanchapanta, D. d. (2011). *Obtención de un Colorante Natural la Betalaína a partir de la Remolacha (Beta Vulgaris) para su Aplicación en Alimentos y Bebidas, sin que sus Propiedades Organolépticas (Olor y Sabor) Afecten su Utilidad*. (Tesis) Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencias e Ingeniería en Alimentos., Ambato, Ecuador.
- Zogzas, N., Maroulis, Z., & Marinou-Kouris, D. (1996). Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs. *Drying Technology: An International Journal*, 14, 2225-2253.

