



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE MASA  
Y CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DURANTE  
LA IMPREGNACIÓN DE UNA MATRIZ  
DE MANZANA (*MALUS DOMESTICA* L.)  
CON JUGO DE BETABEL”**

**TESIS DE MAESTRÍA**

**QUE PARA OBTENER GRADO DE  
MAESTRA EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**PRESENTA:**

**MARIANA AGUIRRE GARCÍA**

**DIRECTOR:**

**DR. IRVING ISRAEL RUIZ LÓPEZ**

**CO-DIRECTOR:**

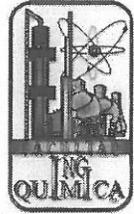
**DR. CARLOS ENRIQUE OCHOA VELASCO**

**BUAP**

H. Puebla Z., diciembre 2017



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA**



**ACTA DE REVISIÓN, LIBERACIÓN E IMPRESIÓN DE TESIS**

Nombre del (de la) estudiante: Mariana Aguirre García

Matrícula: 215471051

Nombre del director: DR. IRVING ISRAEL RUIZ LÓPEZ

Nombre del codirector: DR. CARLOS ENRIQUE OCHOA VELASCO

**Título de la Tesis:**

"ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE MASA Y CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DURANTE LA IMPREGNACIÓN DE UNA MATRIZ DE MANZANA (*MALUS DOMESTICA L.*) CON JUGO DE BETABEL."

**Comisión Revisora:**

Presidente: Dr. Héctor Ruiz Espinosa

Firma: \_\_\_\_\_

Secretario(a): Dra. Edith Corona Jiménez

Firma: \_\_\_\_\_

Vocal (1): Dr. Carlos Enrique Ochoa Velasco

Firma: \_\_\_\_\_

Vocal (2): Dr. Irving Israel Ruiz López

Firma: \_\_\_\_\_

Los integrantes de la Comisión Revisora expresamos que hemos leído y revisado el manuscrito de la tesis de maestría que presenta el (la) estudiante arriba indicado, por lo que **estamos de acuerdo en que se proceda con la impresión definitiva de la tesis y que el (la) estudiante presente su defensa y examen de grado en la fecha, horario y lugar que se indican a continuación.**

Fecha de examen: 8 de diciembre de 2017

Hora: 9:00

Día de la semana: viernes

Lugar: FIQ 8 -201



Revisa y Autoriza: Sello de la Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado. - FIQ. - BUAP

## **Agradecimientos**

A **Dios**, por darme la oportunidad de estar en este mundo y rodearme de gente de la cual he aprendido mucho.

A **mi mamá Teresita de J. García Hernández**, por todo su apoyo, palabras de aliento, jalones de oreja y comprensión en mis momentos de estrés. Me has enseñado que constancia y disciplina todo se puede lograr. Todo lo que me has enseñado lo he llevado a la práctica muchas gracias. ¡Te quiero mucho Ma!

A **mi papá Polo Aguirre Ramos**, por motivarme a alcanzar mis metas, por estar para mí en todo momento y al igual que mamá me has enseñado a no desesperarme, sobre todo a mantener la meta en mente siempre. ¡Te quiero mucho Pa!

A **mis hermanos Israel y Daniel**, por todos los momentos que hemos compartido y su apoyo. ¡Los quiero mucho!

A **Eloina Cadena Torres**, por ser una gran compañera en este viaje llamado Maestría que de no haber coincidido aquí quien sabe si nos hubiéramos conocido. En ti encontré el soporte emocional para seguir adelante, siempre animándome durante este proceso. Llegamos a formar un gran lazo de amistad y fraternidad. Gracias por todos los momentos compartidos con tu familia, gracias por aguantar mis dramas, gracias por las tardes de café, los partidos de voleibol etc.

A **mis compañeros de laboratorio Oscar, Julio, Pau y Esme**, por todos esos momentos de diversión que teníamos en los “ratos libres”, como olvidar al pequeño CAIN de hielo. Los voy a extrañar, muchas gracias por su compañía.

**Al Dr. Carlos E. Ochoa Velazco**, por recibirme en su laboratorio, compartir conmigo sus conocimientos, por estar pendiente de mi progreso, por la recomendación de trabajo, gracias por todo su apoyo durante estos dos años.

**Al Dr. Irving I. Ruiz López**, por confiar nuevamente en mi para la realización de este proyecto y sobre todo por apoyarme en el trago amargo que surgió en el tercer semestre. Le agradezco de todo corazón su apoyo.

**A mis sinodales el Dr. Héctor Espinosa Ruiz y la Dra. Edith Corona Jiménez** por su retroalimentación hacia el presente trabajo.

**Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por haberme otorgado una beca para realizar mis estudios de Maestría.

**Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado** por el apoyo otorgado para la conclusión de esta tesis dentro del Programa II. Investigación y Posgrado. Aseguramiento de la calidad en el Posgrado. Indicador establecido en el Plan de Desarrollo Institucional 2013-2017.

# Índice general

Índice de tablas .....	iv
Índice de figuras .....	vi
Nomenclatura.....	iv
Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	4
1.1 Generalidades de manzana ( <i>Malus domestica</i> L.).....	4
1.1.1 Características nutricionales y físicoquímicas.....	5
1.1.2 Propiedades antioxidantes .....	7
1.1.3 Manzana variedad Granny Smith .....	7
1.2 Generalidades del betabel ( <i>Beta vulgaris</i> L.) .....	8
1.2.1 Características nutricionales y físicoquímicas.....	10
1.2.2. Propiedades antioxidantes .....	11
1.2.3 Características de las betalaínas .....	12
1.3 Alimentos funcionales .....	14
1.3.1 Antioxidantes.....	16
1.3.2 Compuestos bioactivos en alimentos.....	20
1.3.3. Importancia de la presencia de antioxidantes en el betabel.....	26
1.3.4 Nuevas tendencias en el desarrollo de alimentos funcionales.....	26

1.4	Incorporación de compuestos bioactivos a matrices alimenticias.....	27
1.4.1	Deshidratación osmótica.....	28
1.4.2	Modelos de deshidratación osmótica.....	31
2.1	Selección de materia prima.....	35
2.1.1	Elaboración de jugo de betabel.....	35
2.1.2	Geometría de la manzana .....	36
2.2	Caracterización fisicoquímica de manzana y jugo de betabel.....	37
2.2.1	pH .....	37
2.2.2	Sólidos solubles totales.....	37
2.2.3	Acidez titulable.....	37
2.2.4	Color .....	38
2.3	Obtención de los extractos de las muestras sólidas .....	39
2.3.1	Determinación de compuestos fenólicos totales.....	40
2.3.2	Determinación de capacidad antioxidante DPPH + (2,2-difenil-1-picrilhidracilo)...	41
2.3.3	Determinación de betalaínas totales .....	41
2.4	Deshidratación osmótica de la matriz de manzana.....	42
2.4.1	Determinación de cinéticas de deshidratación.....	43
2.5	Determinación de difusividad efectiva.....	46
2.5.1	Determinación de cinéticas de impregnación de compuestos bioactivos.....	47
2.5.2	Caracterización del producto deshidratado.....	47

2.5.3	Obtención de los extractos de manzana control e impregnada.....	48
2.6	Caracterización de los extractos del producto deshidratado.....	49
2.7	Modelado de las cinéticas de osmodeshidratación e impregnación de compuestos bioactivos.....	49
3.1	Caracterización fisicoquímica en fresco de manzana y betabel .....	51
3.2	Pérdida de agua y ganancia de sólidos en equilibrio.....	55
3.2.1	Coeficientes de difusión de agua y sólidos.....	58
3.2.2	Modelación de las curvas de pérdida de agua y ganancia de sólidos con diferentes soluciones osmóticas. ....	59
3.2.3	Parámetros obtenidos con modelo de Azuara para pérdida de agua y ganancia de sólidos.....	62
3.3	Modelación de cinéticas de impregnación de compuesto fenólicos, capacidad antioxidante y betalaínas total (betacianinas y betaxantinas) .....	64
3.3.1	Parámetros obtenidos con modelo de Azuara para compuestos fenólicos totales, capacidad antioxidante y betalaínas totales (betacianinas y betaxantinas).....	68
3.3.2	Coeficientes de difusión de compuestos fenólicos totales, capacidad antioxidante y betalaínas totales (betacianinas y betaxantinas) .....	69
3.4	Caracterización de producto deshidratado con jugo de betabel .....	70
4.	Conclusiones.....	72
5.	Bibliografía.....	73
	Anexo. ....	82

## Índice de tablas

Tabla 1. Composición nutricional de manzana .....	6
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de variedades de manzana (Naes <i>et al.</i> , 2015).....	6
Tabla 3. Concentraciones de compuestos fenólicos totales y actividad antioxidante de tres variedades de manzana (Jihong <i>et al.</i> , 2007).....	7
Tabla 4. Características fisicoquímicas de jugo de betabel .....	10
Tabla 5. Composición fitoquímica del betabel (Wootton-Beard & Ryan, 2011).....	11
Tabla 6. Componentes funcionales adicionados más importantes a los alimentos .....	16
Tabla 8. Ejemplos de antioxidantes endógenos y exógenos (Posada Jaramillo <i>et al.</i> , 2003) .....	17
Tabla 9. Ensayos en vitro de la capacidad antioxidante .....	19
Tabla 7. Clasificación de ácidos fenólicos y algunos ejemplos .....	22
Tabla 10. Modelos empíricos y/o semiempíricos para el proceso de deshidratación osmótica .....	32
Tabla 11. Caracterización físicoquímica de manzana y jugo de betabel.....	53
Tabla 12. Caracterización de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de manzana y betabel.....	54
Tabla 13. Coeficientes de difusión de agua ( $D_w$ ) y ganancia de sólidos ( $D_s$ ) durante el proceso de deshidratación osmótica de manzana.....	59
Tabla 14. Parámetros obtenidos de datos experimentales de osmodeshidratación para tres temperaturas.....	63

Tabla 16. Parámetros obtenidos de datos experimentales de ganancia de compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante durante osmodeshidratación con jugo de betabel para tres temperaturas .....	68
Tabla 17. Parámetros obtenidos de datos experimentales de ganancia de betalaínas totales (betacianinas y betaxantinas) durante osmodeshidratación con jugo de betabel para tres temperaturas.....	69
Tabla 15. Coeficientes de difusión de ganancia de compuestos fenólicos totales ( $D_{CFT}$ ), capacidad antioxidante ( $D_{CA}$ ), betalaínas totales ( $D_{\text{betalaínasT}}$ ), betacianinas ( $D_{BC}$ ) y betaxantinas ( $D_{BX}$ ) durante el proceso de deshidratación osmótica de manzana .....	70
Tabla 18. Contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) en producto deshidratado a tres temperaturas después del tratamiento de osmodeshidratación .....	71
Tabla 19. Contenido de capacidad antioxidante (CA) en producto deshidratado a tres temperaturas después del tratamiento de osmodeshidratación .....	71

## Índice de figuras

Figura 1. Variedades de manzana ( <i>Malus domestica</i> L. ) .....	5
Figura 2. Manzana c.v. Granny Smith.....	8
Figura 3. Planta de betabel ( <i>Beta vulgaris</i> L.).....	9
Figura 4. Estructura general del ácido betalámico .....	12
Figura 5. Estructura general de a) Betaxantinas y b) Betacianinas .....	13
Figura 8. Reacción química entre el radical DPPH y la especie antioxidante .....	20
Figura 6. Estructuras moleculares de a) benzofenona, b) xantona y c) resveratol .....	23
Figura 7. Reacción química entre el reactivo de Folin-Ciocalteu y la especie oxidante.....	25
Figura 9. Diagrama del desarrollo de la metodología .....	34
Figura 10. Materia prima utilizada: a) manzana y b) betabel.....	35
Figura 11. Filtrado del jugo de betabel.....	36
Figura 12. Dimensiones y geometría de la matriz de manzana.....	36
Figura 13. Colorímetro digital.....	38
Figura 14. a) Proceso de molido y b) filtrado de los gajos deshidratadas osmóticamente con jugo de betabel.....	39
Figura 15. Material para realizar las determinaciones compuestos fenólicos totales.....	40
Figura 16. Sistema osmodeshidratación de manzanas: a) manzanas etiquetadas, b) reja para mantener sumergidas las manzanas y c) sistema de osmodeshidratación con jugo de betabel .....	43
Figura 17. Determinación experimental de cinéticas de osmodeshidratación.....	44
Figura 18. Gajos de manzana osmodeshidratadas con jugo de betabel a tres temperaturas.	48
Figura 19. Tamizado de la muestra molida .....	48

Figura 20. Cinéticas experimentales de la pérdida de agua (PA) en el proceso de deshidratación osmótica en gajos de manzana en: a) solución de sacarosa y b) jugo de betabel a tres temperaturas .....	56
Figura 21. Cinéticas experimentales de la ganancia de sólidos (GS) en el proceso de deshidratación osmótica en gajos de manzana en: a) solución de sacarosa y b) jugo de betabel a tres temperaturas. ....	57
Figura 22. Cinética experimental y modelada de la pérdida de sólidos en el proceso de deshidratación osmótica de gajos de manzana: a) solución sacarosa y b) jugo de betabel. .	60
Figura 23. Cinética experimental y modelada de la ganancia de sólidos en el proceso de deshidratación osmótica de gajos de manzana con solución de sacarosa.....	61
Figura 24. Cinética experimental y modelada de la ganancia de sólidos en el proceso de deshidratación osmótica de gajos de manzana con jugo de betabel. ....	62
Figura 25. Cinéticas experimentales y modeladas de impregnación de compuestos fenólicos totales en el proceso de deshidratación osmótica con jugo de betabel de gajos de manzana .....	64
Figura 26. Cinéticas experimentales y modeladas de ganancia de capacidad antioxidante en el proceso de deshidratación osmótica con jugo de betabel de gajos de manzana.....	65
Figura 27. Cinéticas experimentales y modeladas de impregnación de betalaínas en gajos de manzana a tres temperaturas.....	67
Figura 28. Cinéticas experimentales y modeladas de impregnación de betacianinas y betaxantinas en gajos de manzana a tres temperaturas.....	67

## Nomenclatura

$D$	difusividad efectiva en el alimento ( $m^2/s$ )
$GS$	ganancia de sólidos (g soluto ganado/g producto fresco)
$k$	parámetro del modelo de Azuara (adimensional)
$L$	longitud característica de difusión (m)
$m_o$	masa del producto fresco antes de secarla hasta peso constante (g)
$m_o^{DO}$	masa de la muestra osmodeshidratada antes de secarla hasta peso constante (g)
$m_l$	masa del producto fresco después de secarla hasta peso constante (g)
$m_l^{DO}$	masa de muestra osmodehidratada después de secarla hasta peso constante (g)
$m_w$	masa de agua presente en la muestra antes del proceso de deshidratación osmótica (g)
$m_w^{DO}$	masa de agua presente en la muestra después del proceso de deshidratación osmótica (g)
$m_i$	masa de cada una de las muestras frescas (g)
$m_i^{DO}$	masa de cada una de las muestras osmodeshidratadas (g)
$m_s$	masa de sólidos presentes en la muestra antes del proceso de deshidratación osmótica (g)
$m_s^{DO}$	masa de sólidos presentes en la muestra después del proceso de deshidratación osmótica (g)
$PA$	pérdida de agua (g agua perdida/g producto fresco)
$t$	tiempo de proceso (min)
$Y$	fracción de agua perdida de la matriz a un tiempo (adimensional)
$Y_\infty$	fracción de agua perdida por la matriz en el equilibrio (adimensional)
$Y_s$	fracción de agua que permanece dentro de la matriz a un tiempo $t$ (adimensional)

# Introducción

Durante las últimas décadas ha aumentado el interés de la población en el consumo de alimentos que brinden beneficios hacia la salud y que, al mismo tiempo, se encuentren mínimamente procesados o listos para consumir. Esta situación ha propiciado que la industria de alimentos se enfoque en el desarrollo de productos denominados como funcionales, los cuales se caracterizan por contener compuestos o microorganismos de interés que proporcionan un beneficio añadido a la salud al ser ingeridos. Dentro de los compuestos, los fitonutrientes o compuestos bioactivos son los de mayor relevancia debido a su potencial antioxidante.

Por otra parte, los productos de origen vegetal contienen enzimas responsables de propiciar cambios indeseables (pardeamiento o ablandamiento enzimático) durante su procesado. Por lo tanto, el evitar la oxidación de frutas y hortalizas durante el procesado y almacenamiento se ha convertido en una prioridad para la industria alimenticia, puesto que la oxidación es la segunda causa más importante del deterioro en alimentos de origen vegetal, antecedida sólo por la contaminación microbiológica. Al respecto se han desarrollado métodos químicos y físicos para evitar la oxidación; dentro de los métodos químicos se encuentran la adición de antioxidantes con la finalidad de evitar que entre en contacto la enzima con el sustrato.

Con respecto a los antioxidantes, estos se clasifican en naturales y sintéticos. Se puede mencionar que éstos últimos han sido ampliamente utilizados en la industria debido a su bajo costo y alta efectividad. No obstante, los antioxidantes sintéticos han sido reconocidos como cancerígenos y tóxicos; por lo que es necesario contar con sustitutos naturales que brinden

las mismas condiciones que los primeros a un menor costo y sin presentar riesgos para la salud. En este sentido, la incorporación ya sea al vacío o a presión atmosférica (deshidratación osmótica) de compuestos bioactivos con capacidad antioxidante puede constituir una de las formas más viables de incorporación debido a que puede ser utilizada en diferentes matrices tales como frutas y verduras.

Por lo anterior, en el presente trabajo se propuso realizar un tratamiento de impregnación osmótica para incorporar a gajos de manzana los antioxidantes presentes en el jugo de betabel. Posteriormente, se realizó un proceso de secado convectivo y se estudió la transferencia de masa y la presencia de compuestos bioactivos en los gajos tratados. En este sentido se aplicó el modelo de Azuara para predecir a partir de datos experimentales sin necesidad de llegar al equilibrio el proceso de osmodeshidratación. Se estimó la difusividad efectiva con la finalidad de determinar un modelo matemático capaz de predecir tanto la evolución de los gradientes de humedad como del valor promedio, así como la impregnación de los compuestos bioactivos a lo largo del proceso de osmodeshidratación. Los resultados obtenidos podrían ser utilizados para una optimización posterior del proceso de secado de este producto.

# Objetivos

## Objetivo general

Estudiar las propiedades de transporte de masa del proceso de deshidratación osmótica y secado convectivo de compuestos fenólicos, betalaínas totales y capacidad antioxidante en gajos de manzana con jugo de betabel.

## Objetivos particulares

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y antioxidantes el jugo de betabel y los gajos de manzana.
- Obtener cinéticas de deshidratación osmótica de gajos de manzana a diferentes temperaturas utilizando solución de sacarosa y solución de jugo de betabel ajustado con sacarosa.
- Evaluar el efecto de la impregnación sobre la deshidratación osmótica de gajos de manzana.
- Estimar los coeficientes de difusión de agua ( $D_w$ ), solutos ( $D_s$ ), compuestos fenólicos totales ganados ( $D_{cf}$ ), capacidad antioxidante ganada ( $D_{ca}$ ), betalaínas totales ganadas ( $D_{\text{betalaínasT}}$ ), betacianinas ganadas ( $D_{BC}$ ) y betaxantinas ganadas ( $D_{BX}$ ) durante el proceso de impregnación de gajos de manzana.
- Evaluar el efecto de la deshidratación osmótica sobre los compuestos fenólicos, capacidad antioxidante en gajos de manzana.

# 1. Antecedentes

En esta sección se desarrollan los temas que enmarcan el presente trabajo. Primeramente, se describen las características fisicoquímicas, propiedades nutricionales y antioxidantes de la manzana (*Malus domestica* L.) y betabel (*Beta vulgaris* L.). En seguida se habla sobre los alimentos funcionales, su importancia en cuanto a la prevención de enfermedades crónico-degenerativas y las nuevas tendencias en el desarrollo de éstos; como lo son el uso de compuestos bioactivos. Más adelante se detallan los fundamentos para la determinación compuestos bioactivos y capacidad antioxidante. En la última sección se describe el método de deshidratación osmótica como una forma de impregnación de compuestos bioactivos y se mencionan los modelos que han sido utilizados para optimizar el proceso de secado.

## 1.1 Generalidades de manzana (*Malus domestica* L.)

La manzana es una de las frutas mayormente consumidas a nivel mundial. Su gran cantidad de variedades existentes hacen que se encuentre al alcance del consumidor todo el año. Es una fruta pomácea comestible del manzano, su nombre científico es *Malus domestica* L.

Esta fruta es una de las principales fuentes de alimentación en países con climas fríos, por lo que se cree que sea uno de los frutos más antiguos de nuestra civilización. En cuanto a las variedades más importantes y conocidas se encuentran Red Delicious, Golden Delicious, Starking, Golden, Gala, Chihuahua y Granny Smith (Pacheco-Estay, 2009). Tanto el color de piel como la forma dependen de la variedad (Figura 1).

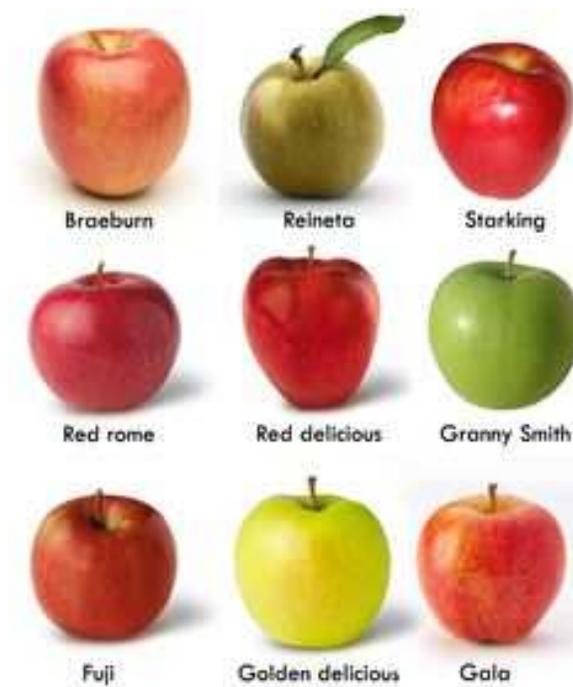


Figura 1. Variedades de manzana (*Malus domestica* L.)

Al cierre del 2016, la producción total de manzana en nuestro país fue de 716,930 toneladas, con un valor de 4.66 mil millones de pesos, en una superficie cosechada de 54,248 hectáreas (SIAP, 2017). Chihuahua aportó 81.8% del volumen nacional recolectado, seguido a distancia por Durango y Puebla con 5.9% y 5.2%, respectivamente (SIAP, 2017).

#### 1.1.1 Características nutricionales y físicoquímicas

Las características nutricionales más notables de la manzana incluyen un alto contenido de minerales, fibra dietética y varios compuestos biológicamente activos como ácido ascórbico y compuestos fenólicos (Ravichandran *et al.*, 2013). De acuerdo con el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) el contenido nutricional de la

manzana se muestra a continuación (Tabla 1):

Tabla 1. Composición nutricional de manzana

	<b>Valor por 100 g</b>
Energía (kJ)	218
Humedad (%)	85.56
Cenizas (g)	0.19
Proteína (g)	0.26
Carbohidratos (g)	13.81
Fibra cruda (g)	2.4
Ácido ascórbico (mg)	4.6
Tiamina (mg)	0.017
Rivoflavina (mg)	0.026
Niacina (mg)	0.091
Vitamina A (µg)	3.0

La manzana aporta hidratos de carbono principalmente en forma de azúcares simples como fructuosa, glucosa y sacarosa. Presenta cantidades apreciables de fibra tanto soluble como insoluble siendo esta última la responsable de hacer que este alimento sea un eficaz regulador de enfermedades digestivas. En cuanto a sus propiedades fisicoquímicas se reporta un pH de 2.8 a 3.3 para la mayoría de las variedades. Sin embargo, para acidez titulable (AT) y sólidos solubles totales (SST) el valor depende de la variedad de manzana (Tabla 2).

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de variedades de manzana (Naes *et al.*, 2015)

<b>Variedad</b>	<b>Acidez titulable</b> (% ácido málico)	<b>Sólidos solubles totales</b> (°Brix)	<b>Índice de madurez</b>	<b>Firmeza</b> (N)
Starking	0.21 ± 0.01	15.4 ± 0.72	74.8 ± 3.68	57.8 ± 0.22
Golden Delicious	0.26 ± 0.03	12.6 ± 0.45	51.0 ± 6.75	63.7 ± 0.21
Granny Smith	0.45 ± 0.04	11.9 ± 0.58	27.4 ± 2.44	74.5 ± 0.09
Fuji	0.22 ± 0.01	13.3 ± 0.20	62.8 ± 3.76	72.5 ± 0.29

### 1.1.2 Propiedades antioxidantes

La manzana es una fruta que constituye una de las principales fuentes de polifenoles en la dieta. Los polifenoles presentes en este fruto son de radical importancia debido a que intervienen en su calidad sensorial ya sea frescos o procesados. Como se mencionó anteriormente, también son reconocidos por sus propiedades antioxidantes que promueven la salud. La capacidad antioxidante de los polifenoles de manzana se encuentra dentro de los más altos en frutas y verduras comúnmente consumidas a nivel mundial (Vega-Gálvez *et al.*, 2012); esto es debido a su alto contenido de ácidos fenólicos (ácido hidroxicinámico) y flavonoides como 3-flavanoles, dihidrochalcones, flavonas y antocianinas (Palomo *et al.*, 2010). Aunado a esto, la presencia de ácido ascórbico contribuye a la capacidad antioxidante total de los polifenoles (Tabla 3). Sin embargo, se ha observado que durante el procesamiento de la manzana se causa una disminución importante en el contenido de compuestos fenólicos y por consiguiente en su actividad antioxidante (McGhie *et al.*, 2005).

Tabla 3. Concentraciones de compuestos fenólicos totales y actividad antioxidante de tres variedades de manzana (Jihong *et al.*, 2007).

<b>Variedad</b>	<b>Compuestos fenólicos totales (mg GAE*/g de producto fresco)</b>	<b>Actividad antioxidante (mg Trolox /g de producto fresco)</b>
Galaxy	2.9 ± 0.2	1.8 ± 0.2
Gala	1.5 ± 0.2	1.5 ± 0.1
Granny Smith	2.0 ± 0.3	2.4 ± 0.4

\*equivalentes de ácido gálico

### 1.1.3 Manzana variedad Granny Smith

La variedad Granny Smith es originaria de Australia donde se cultiva desde 1868. Presenta una coloración verde brillante en la cáscara, en ocasiones puede desarrollar una ligera ruboración rosada. En cuanto a la pulpa, es de color blanco a blanco verdoso. Esta variedad de manzana es generalmente crujiente y jugosa, aunque carece de un sabor particular

## 1.2 Generalidades del betabel (*Beta vulgaris* L.)

---

debido a que predomina una acidez. A diferencia de otras variedades, la Granny Smith (Figura 2) tiene una baja producción de etileno y un bajo potencial de pardeamiento enzimático, lo cual es benéfico para procesarla puesto que madura más lento y no se oxida tan rápido como las demás variedades (Tomic *et al.*, 2016; Pérez-Illarbe *et al.*, 1997).



Figura 2. Manzana c.v. Granny Smith

## 1.2 Generalidades del betabel (*Beta vulgaris* L.)

El betabel es un vegetal nativo de Alemania y se cultiva en Francia, Norteamérica y Polonia; pertenece a la familia Chenopodiaceae y su nombre botánico es *Beta vulgaris* L. (Figura 3). Es una planta bienal, florece y produce semilla en el segundo año, excepto bajo condiciones especiales (Casseres, 1980). Es un cultivo vegetal importante el cual se puede encontrar en todo el mundo. No se considera un vegetal popular de consumo; sin embargo, es una excelente fuente de betalaínas, así como, una fuente importante de carbohidratos, principalmente sacarosa (6.6%) (Lee *et al.*, 2005).

El uso del betabel es permitido en diversos productos comerciales como lo son lácteos, helados, sorbetes, bebidas, confitería, sopas, así como en productos de tomate y tocino (Bazaria & Kumar, 2016).



Figura 3. Planta de betabel (*Beta vulgaris* L.)

El betabel es considerado como una hortaliza de raíz, aunque en realidad se trata de un “tallo engrosado bulboso”, y constituye un órgano de almacenamiento, principalmente de azúcares y almidones; también las hojas del betabel cocidas son comestibles. El sistema de raíces es muy profundo y ramificado; el tallo floral puede alcanzar una altura de 1 a 1.3 m; presenta flores hermafroditas, con estambres y pistilos pudiendo aparecer solas o en grupos (panícula) apretados de dos o tres; las hojas son de color verde intenso y los pecíolos son de color rojo o púrpura. Es una planta de clima frío, aunque se puede explotar en clima cálido. La temperatura de germinación es de 10 a 30°C, siendo la óptima entre 20 y 25°C; la temperatura para el desarrollo es de 16 a 21°C. Esta hortaliza tolera bien las heladas, a temperaturas mayores de 25°C se forman anillos concéntricos de color blanco en el tallo bulboso y baja el contenido de azúcares. El betabel es sensible a suelos ácidos, se desarrolla mejor en suelos neutros y alcalinos, prefiriendo un pH de 6.5 a 7.5, es totalmente tolerante a la salinidad; en cuanto a textura, se desarrolla mejor en suelos ligeros (arenosos) ya que en suelos arcillosos se deforman los bulbos. Para la cosecha se utilizan tres indicadores; uno que

implica conocer el diámetro del bulbo (entre 8 y 10 cm) y otro es el tiempo en días, 60 a 80 días para cultivares precoces, 80 a 100 días para intermedios y 100 a 110 para tardíos (SAGARPA, 2015); finalmente, la madurez de cosecha, lo que implica que los bulbos se cosechan cuando las raíces han alcanzado el tamaño deseable (Davis, 2015).

### 1.2.1 Características nutricionales y fisicoquímicas

El betabel es rico en fibra (2.9%) con un valor calórico moderado de 42.6 cal/100g de producto fresco comparado con la zanahoria los cuales presenta: 2.8 % de fibra, 4.74 % de azúcares y 41 kcal/100g. Por otro lado, se sabe que contiene numerosos minerales (Ca, Fe, Mg, P, K, Na y Zn) y vitaminas (A, C, D, K, tiamina, riboflavina, niacina y folato) (USDA, 2017).

Wruss *et al.* (2015) reportaron las siguientes características fisicoquímicas del jugo de betabel basadas en siete variedades distintas (Tabla 4):

Tabla 4. Características fisicoquímicas de jugo de betabel

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
pH	6.1 ± 0.1
Sólidos solubles totales (°Brix)	9.7 ± 0.1
Azúcares	
Glucosa (g/kg)	15.1 ± 0.1
Fructosa (g/kg)	14.6 ± 0.2
Sacarosa (g/kg)	50.8 ± 0.1
Contenido total de azúcares (g/kg)	80.5 ± 0.2

1.2.2. Propiedades antioxidantes

El jugo del betabel contiene un alto nivel biológico accesible de antioxidantes. Sin embargo, su consumo no es tan popular como el de otros vegetales como el jitomate, la zanahoria, la manzana o el mango, tal vez por los problemas de percepción de sabor y textura, además de que genera coloración en la orina (Ravichandran *et al.*, 2013; Wootton-Beard & Ryan, 2011).

La capacidad antioxidante del jugo del betabel está fuertemente relacionada con la cantidad de pigmentos rojos y amarillos, que conforman a las betalaínas, así como del alto contenido de compuestos fenólicos totales (Czapski *et al.*, 2009; Wootton-Beard & Ryan, 2011).

En la Tabla 5 se presenta la composición fitoquímica del betabel, formada principalmente por betalaínas, conjugados del ácido ferúlico, amidas fenólicas y flavonoides.

Tabla 5. Composición fitoquímica del betabel (Wootton-Beard & Ryan, 2011)

Clasificación	Compuestos
Conjugados de ácido ferúlico	5,5',6,6'-tetrahidroxi-3,3'-biindolil
	Feruloiglcucosa
	$\beta$ -d-fructofuranosil- $\alpha$ -d-(6-O-(E)-feruloilglucopiranosido)
Amidas fenólicas	N-trans-feruloiltiramina
	N-trans-feruloilhomovanililamina
Flavonoides	Betagarina
	Betavulgarina
	Cocliofilin A
	Dihidroisoramnetina
Betalaínas	Betaxantinas (vulgaxantina I y II)
	Betacianinas (Betanina, Isobetanina)

1.2.3 Características de las betalaínas

El betabel posee pigmentos que pertenecen al grupo de los antioxidantes. Los pigmentos más abundantes en el betabel son las betalaínas, que son químicamente definidas como derivados del ácido betalámico (Figura 4). Las principales fuentes vegetales de betalaínas son las raíces de *Beta vulgaris* L, el tallo de *Amaranthus* y los frutos de las especies del género *Opuntia* (Czapski *et al.*, 2009; Moreno *et al.*, 2007).

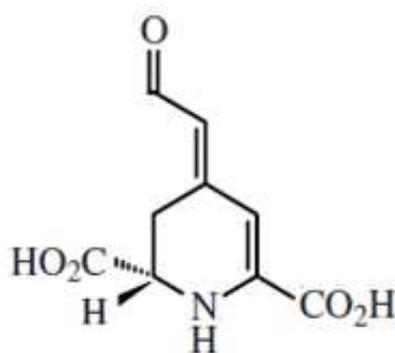


Figura 4. Estructura general del ácido betalámico

El término betalaínas se refiere a un grupo de aproximadamente 70 pigmentos hidrosolubles, con estructuras de glucósidos, derivados de la 1,7-diazoheptametina, y que se han dividido en dos grandes clases: los pigmentos rojos o betacianinas, y los pigmentos amarillos o betaxantinas. De manera general, las betalaínas son similares a las antocianinas en apariencia visual y anteriormente se les llamaba antocianinas nitrogenadas. Estos pigmentos se encuentran sólo en 10 familias: Aizoaceae, Amaranthaceae, Basellanaceae, Cactaceae, Chenopodaceae, Didiereaceae, Holophytaceae, Nyctaginaceae, Phytolaccaceae y Portulacaceae. También se han encontrado algunas betalaínas de origen fúngico como *Amanita* y *Hygrocybe*. De la misma manera que las antocianinas, se acumulan en las vacuolas celulares de las flores, frutas y hojas que las sintetizan, principalmente en la epidermis y la

subepidermis (Badui-Dergal, 1999). Las antocianinas y las betalaínas, nunca han sido reportadas en la misma planta, por lo que son mutuamente excluyentes (Azeredo, 2009), esto se debe a una diferencia estructural basada en que el precursor de la betalaína es la tirosina y el precursor de las antocianinas es la fenilalanina (Stintzing & Carle, 2007). Las betalaínas por su parte son más estables al pH y la temperatura, por lo que pueden utilizarse en alimentos ligeramente ácidos, lo que no es posible con las antocianinas (Ravichandran *et al.*, 2013).

Las betalaínas que van desde un color amarillo-rojo contienen compuestos de nitrógeno que se derivan de la tirosina. Comprenden dos tipos de pigmentos hidrosolubles las betaxantinas (Figura 5a) (que predominan en el betabel caracterizados por pigmentos rojo-violeta) y las betacianinas (Figura 5b) (pigmentos amarillos), (Azeredo, 2009; Latorre *et al.*, 2010; Prudencio *et al.*, 2008) químicamente son moléculas derivadas del ácido betalámico (Moreno *et al.*, 2007).

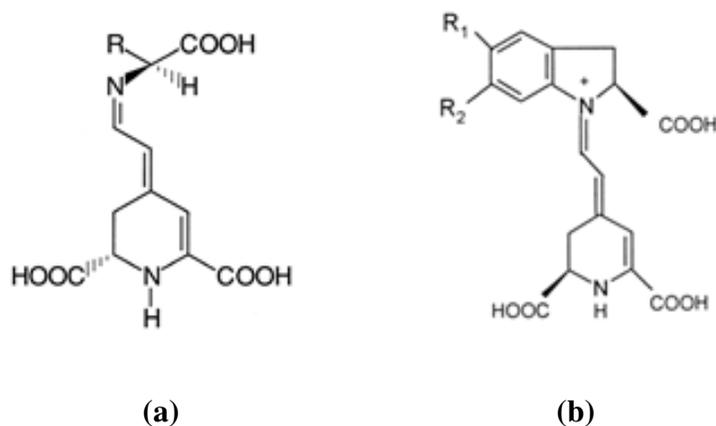


Figura 5. Estructura general de a) Betaxantinas y b) Betacianinas

Las betacianinas muestran dos máximos picos de absorción, uno en el intervalo UV (270-280nm), y una segunda en el intervalo visible (535 a 540 nm, en función del disolvente). Las betaxantinas, poseen diferentes aminoácidos o cadenas laterales amino con un máximo de absorción a 480 nm (Azeredo, 2009). Las betalaínas poseen un número de sustituyentes, tales

como glucosa, ácido glucurónico y apiosa; como monómeros de azúcar y compuestos como el ácido malónico y ácido 3- hidroxí-3-metilglutarico, así como el ácido cafeíco, ácido p-cumárico y ácido felúrico, que representan los constituyentes típicos ácidos (Stintzing & Carle, 2007).

La estabilidad de las betalaínas está fuertemente influenciada por las enzimas presentes en su estructura y composición, pH, actividad de agua (aw), oxígeno, luz, metales, temperatura, ácido ascórbico y azúcares (Chethana *et al.*, 2007; Lopez-Martinez *et al.*, 2009). La temperatura es un factor muy importante que influencia la estabilidad de las betalaínas, debido a que como lo mencionan Ravichandran (2013) la degradación de las betalaínas posee una relación directamente proporcional con respecto al aumento de la temperatura.

## 1.3 Alimentos funcionales

En la actualidad la población busca alimentarse de forma más nutritiva; sin embargo, su estilo de vida no lo ha permitido. La alimentación es un factor de influencia muy importante, pero no el factor étnico que incrementara la incidencia en la tasa de personas con enfermedades crónico-degenerativas, tales como enfermedades coronarias, diabetes tipo II, osteoporosis, arteriosclerosis, ciertos tipos de cáncer, Alzheimer, hipertensión, etc. Este problema propició que existiera un aumento en el recurso destinado al sector salud con el fin de poder atender a la población afectada, lo cual podría ser reducido si la población gozara de buena salud (Martirosyan & Singh, 2015).

Dado lo anterior, se desarrolló dentro de la ciencia de alimentos el área de los alimentos funcionales, la cual es considerada como una fusión entre nutrición, medicina y la propia ciencia de alimentos. Esta ciencia fue fundada en colaboración con científicos del área de alimentos y el sector de salud pública, en respuesta a los problemas de salud que como los mencionados anteriormente se presentaban entonces. Se tiene registro que el término de alimento funcional surge en Japón a principios de los 80's al ser asignados fondos de investigación provistos por el gobierno. El objetivo principal era estudiar a fondo los efectos que producían en la salud al ser ingeridos; se les denominó FOSHU de las siglas en inglés Foods for Specific Health Uses. La primera definición propuesta fue: “aquellos productos alimenticios enriquecidos con componentes especiales que poseen efectos fisiológicos benéficos” (Martirosyan & Singh, 2015). Sin embargo, una gran cantidad de alimentos existentes en el mercado podrían confundirse con alimentos funcionales, por lo que la legislación en Japón de los FOSHU estableció que para que fueran considerados bajo este término debían cumplir con los siguientes requisitos:

- Efectividad en los estudios clínicos realizados a los consumidores.
- Seguridad en estudios clínicos y no clínicos.
- Determinación de los componentes activos.

A inicios de 1990 en Estados Unidos, la Academia de Ciencia de Alimentos y Nutrición los definieron como “cualquier alimento o ingrediente modificado el cual puede proporcionar algún beneficio a la salud más allá de los nutrientes originales que contiene” (Cortés, Chiralt, & Puente, 2005).

Asimismo, durante esa década los especialistas comenzaron a identificar a los componentes bioativos en fuentes vegetales y animales con los cuales confiaban en que podría reducir potencialmente las enfermedades crónicas (Hasler, 2002).

En la actualidad existen diferentes métodos para el desarrollo de alimentos funcionales entre los más importantes se encuentra la adición o eliminación de algún componente, alguna modificación durante su procesamiento, ingeniería genética, entre otros. Algunos de los componentes utilizados se muestran a continuación (Tabla 6):

Tabla 6. Componentes funcionales adicionados más importantes a los alimentos

<b>Componentes</b>	<b>Características</b>
Probióticos	Son microorganismos vivos que al ser ingeridos bajo ciertas cantidades tendrán un impacto positivo en la salud del consumidor. Ej: lactobacilos y bifidobacterias (López-Varela <i>et al.</i> , 2002).
Prebióticos	Son ingredientes no digeribles que benefician al huésped mediante la estimulación selectiva del crecimiento y/o actividad de un número limitado de bacterias en el colon (Moreno <i>et al.</i> , 2007).
Simbióticos	Combinación entre los probióticos y los prebióticos.
Micronutrientes	Son compuestos los cuales pueden influir en varios componentes del sistema inmune. Ej: selenio, vitaminas A, vitamina C, etc. (Erickson <i>et al.</i> , 2000).

### 1.3.1 Antioxidantes

Los antioxidantes presentes en los alimentos pertenecen a una categoría heterogénea de moléculas; son compuestos de sistemas que pueden intercambiar sus radicales libres de forma

segura y terminar la reacción en cadena antes de que las moléculas vitales puedan ser dañadas (Oroian & Escriche, 2015).

La actividad antioxidante de muchas sustancias depende del metabolismo celular y son conocidas como antioxidantes endógenos, entre los cuales están la superóxido-dismutasa, las catalasas y el glutatión. También existen factores nutricionales conocidos como antioxidantes exógenos, siendo los más estudiados el alfa-tocoferol, el betacaroteno, el ácido ascórbico y los polifenoles (Tabla 8).

Tabla 7. Ejemplos de antioxidantes endógenos y exógenos (Posada Jaramillo, *et al.* 2003)

<b>Antioxidantes endógenos</b>	<b>Antioxidantes exógenos</b>
Glutation	Ácido ascórbico
Coenzima Q	Alfa-tocoferol
Proteínas: Ceutoplasmina	Betacaroteno
Lactoferrina	Luteína
Bilirrubina	Licopeno
Enzimas: glutatión reductasa	Betalaínas
glutatión transferasa	Flavonoides
glutatión prooxidasa	Minerales: selenio
superóxido dismutasa	cobre
catalasa	zinc
	hierro

Dentro de los mecanismos más importantes que pueden llevar a cabo los antioxidantes se encuentran: el ser especies que inhiben la peroxidación, presentar iones metálicos quelantes los cuales son capaces de inhabilitar especies reactivas o descomponer peróxidos, propician la ruptura de la reacción en cadena auto-antioxidante y la reducción de concentraciones localizadas de O<sub>2</sub> (Oroian & Escriche, 2015).

Algunas propiedades biológicas de los antioxidantes son las relacionadas con los efectos antiinflamatorio, anticancerígeno y antiaterosclerótico, así como reducción de la incidencia de enfermedades coronarias y su contribución al mantenimiento de la modulación del calor

del intestino por el equilibrio intestinal. Los principales compuestos con actividad antioxidante son: vitaminas (vitamina C y vitamina E), carotenoides (carotenos y xantofilas) y polifenoles (flavonoides, ácidos fenólicos, lignanos y estilbenos) (Oroian & Escriche, 2015).

Los antioxidantes se pueden clasificar en dos tipos basados en su fuente como: naturales y sintéticos. En este sentido, existe una creciente preocupación por los consumidores respecto a los antioxidantes sintéticos en cuanto a si son seguros al consumirlos, lo cual los motiva a buscar alimentos que contengan productos de origen natural. Los antioxidantes naturales se encuentran presentes en la mayoría de productos de origen vegetal, lo cual los hace fácilmente asimilables por el cuerpo al ser ingeridos. Por otro lado, los antioxidantes sintéticos por ejemplo, butilhidroxianisol (BHA) y el butilhidroxitolueno (BHT), se ha encontrado que pueden causar efectos adversos a los consumidores además de que no aportan beneficios nutricionales adicionales (Embuscado, 2015).

La capacidad antioxidante total es el indicativo de la forma de actuar colaborativamente (aditivo y posiblemente sinérgico) de todos los antioxidantes presentes en una muestra compleja, es considerado por la mayoría de los investigadores como el parámetro más útil para evaluar las defensas antioxidantes en alimentos o plasma que determinar por separado las concentraciones de los constituyentes antioxidantes individuales (Apak *et al.*, 2016).

La capacidad antioxidante de frutos puede evaluarse *in vitro* e *in vivo* con base a las reacciones químicas involucradas principalmente en dos categorías:

- Basados en la transferencia de un átomo de hidrógeno, donde el antioxidante y el sustrato compiten por el radical libre sintético, una molécula es oxidable y la otra antioxidante (Leyva, 2009).

- Basados en la transferencia de electrones, involucra una reacción de oxidación con el antioxidante que es un indicador del punto final de la misma (Leyva, 2009).

En la Tabla 9 se muestran los métodos según la reacción utilizada para la cuantificación de actividad antioxidante.

Tabla 8. Ensayos en vitro de la capacidad antioxidante

Mecanismo	Método
Por transferencia de un átomo de hidrógeno	ORAC (Oxygen Radical Absorbance Capacity)
	TRAP (Total Radical Trapping Antioxidant Parameter)
	IOU (Inhibited Oxygen Uptake)
Por transferencia de electrones	TEAC (Trolox Equivalente Antioxidant Capacity)
	FRAP (Ferric Ion Reducing Antioxidant Parameter)
	DPPH + (2,2-difenil-1-picrilhidracilo)
	ABTS + 2,2'-Azino-bis (3-etilenbenzotiazolino-6-ácido sulfónico)
Otros	TOSC (Total Oxidant Scavering Capacity)

De los métodos mencionados anteriormente la resolución del compuesto DPPH es el que mayormente se reporta; este compuesto se caracteriza por poseer un electrón desapareado que es el radical libre estable 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH), estabilizado por resonancia. Por esta propiedad, el compuesto DPPH se utiliza como reactivo de referencia para determinar el poder antioxidante de una sustancia por captura de radicales libres (Avella *et al.*, 2008).

Este método permite la evaluación de la actividad de sustancias con su radical en una solución etanólica que tiene un color violeta intenso que se pierde progresivamente a color amarillo cuando se añade la muestra que contiene antioxidantes. La decoloración del radical se determina alrededor de 517 nm y la cuantificación se realiza por lo general empleando soluciones de Trolox (análogo sintético de la vitamina E) (Leyva, 2009).

Cuando una disolución de DPPH entra en contacto con una sustancia que puede donar un átomo de hidrógeno o con otra especie radical (R) se produce la forma reducida DPPH-H ó DPPH-R con la consecuente pérdida de color (Figura 8) y por lo tanto la pérdida de la absorbancia (Molyneux, 2004).



Figura 6. Reacción química entre el radical DPPH y la especie antioxidante

### 1.3.2 Compuestos bioactivos en alimentos

Los compuestos bioactivos son componentes extranutricionales que se encuentran en pequeñas cantidades en los alimentos. Actualmente se están estudiando para evaluar sus efectos en la salud puesto que se ha observado que han mostrado efectos protectores sobre todo con enfermedades cardiovasculares. Este tipo de compuestos presenta una amplia variedad de estructuras y funciones. Hans-Konrad *et al.* (2009) los definen como compuestos esenciales o no esenciales (vitaminas, antioxidantes, polifenoles, etc.) que están presentes en la naturaleza como parte de la cadena alimenticia, los cuales ha sido demostrado que tienen un efecto benéfico en la salud. Además de ayudar en la reducción de riesgo de enfermedades cardiovasculares, también previenen enfermedades como cáncer, derrame cerebral,

Alzheimer, entre otras enfermedades relacionadas con el estrés oxidativo (Łata *et al.*, 2009). Este tipo de compuestos se encuentran presentes principalmente en frutas y verduras los cuales pueden ser clasificados como orgánicos e inorgánicos. Por ejemplo, orgánicos como los compuestos fenólicos, lípidos, isoprenoides e inorgánicos como calcio, selenio, zinc, potasio entre otros.

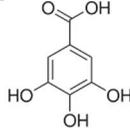
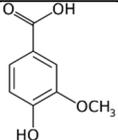
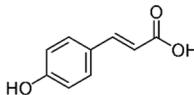
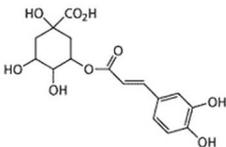
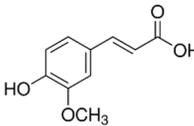
Los compuestos bioactivos mayormente conocidos son los compuestos fenólicos que incluye a los flavonoides, los cuales se encuentran presentes en todas las plantas y han sido estudiados extensamente en cereales, legumbres, nueces, aceite de oliva, verduras, frutas, té y vino tino. Muchos compuestos fenólicos tienen propiedades antioxidantes; algunos estudios ha demostrado que presentan efectos favorables sobre la trombosis y la tumorigenesis (Kris-Ehrton *et al.*, 2002).

Los compuestos fenólicos representan uno de los grupos de micronutrientes más importantes en la dieta humana, puesto que se encuentran ampliamente distribuidos en productos de origen vegetal. El término compuestos fenólicos totales engloba a todas aquellas sustancias que poseen al menos un grupo fenol, unidos a estructuras aromáticas o alifáticas (Gimeno-Creus, 2004). Se trata de un amplio grupo de compuestos producto del metabolismo secundario de las plantas, que usan como protección o pigmentación (Jiménez, 2007).

Los compuestos fenólicos se pueden clasificar en tres grupos:

1. **Ácidos fenólicos:** Consisten en dos grupos (1) ácidos hidroxibenzóicos y (2) ácidos hidroxicinámicos (Tabla 7). Algunos ejemplos de fuentes de éstos últimos se encuentran en uvas, manzanas, arándanos, espinacas, brócoli, col, café y cereales (Peñarrieta *et al.*, 2008).

Tabla 9. Clasificación de ácidos fenólicos y algunos ejemplos

Ácidos fenólicos	Nombre	Estructura
Ácidos hidroxibenzóicos	Ácido vanílico	
	Ácido gálico	
Ácidos hidroxicinámicos	Ácido p-coumérico	
	Ácido clorogénico	
	Ácido ferúlico	

2. **Xantonas, estibenos y benzofenonas:** estos compuestos se encuentran fácilmente en plantas, raíces y frutas exóticas. Presentan propiedades frente a diferentes enfermedades crónicas tales como inflamación, artritis, enfermedades cardiacas, así como retrasar el envejecimiento, en la Figura 6 (Whitaker & Lee, 1995). Se observan algunos ejemplos (Peñarrieta *et al.*, 2008).

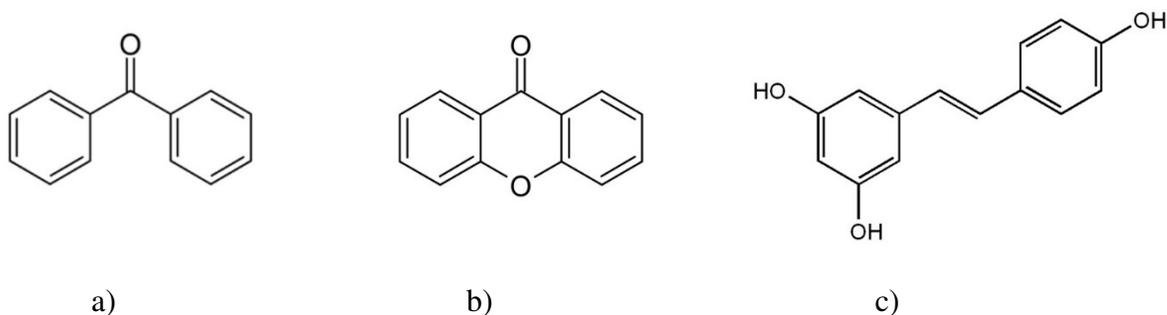


Figura 7. Estructuras moleculares de a) benzofenona, b) xantona y c) resveratol

3. **Quinonas:** Este tipo de compuestos están presentes en alimentos como el betabel en forma de pigmentos (betanidina y isobetanidina).
4. **Flavonoides:** Son compuestos responsables de brindar color amarillo a ciertos frutos y flores (chalconas, auronas, flavonas y flavonales).
5. **Taninos:** Son compuestos fenólicos hidrosolubles de sabor áspero y amargo, presentan propiedades astringentes y antiinflamatorias.

Por otra parte, en diversos artículos se ha reportado que los ácidos fenólicos, son los responsables de impartir ciertas características sensoriales como sabor y aroma, además de intervenir como antioxidantes. Esto sugiere que su uso podría ser una opción para reducir en el uso de aditivos antioxidantes (Porrás-Loaiza & López-Malo, 2009). Su actividad antioxidante se asocia al papel que desempeñan al proteger a sus consumidores de enfermedades cardiovasculares y/o cáncer.

Los compuestos fenólicos totales pueden actuar como antioxidantes mediante dos mecanismos principales:

- A. Como captadores de radicales libres: actúan como donantes de hidrógeno o electrones en reacciones de determinación que rompen el ciclo de generación de nuevos radicales

libres, deteniendo las reacciones en cadena en las que están implicados los radicales libres, el radical fenoxilo generado es menos reactivo dado que se estabiliza por resonancia con los electrones “p” del anillo aromático (Leyva, 2009).

- B. Como quelantes de metales: requiere la presencia de grupos hidroxilos cercanos en el anillo aromático, de este modo, los o-dihidroxifenoles son secuestradores efectivos de iones metálicos e inhiben la generación de radicales libres al formar complejos con metales di o trivalentes, especialmente con el hierro y el aluminio (Gimeno-Creus, 2004).

Sin embargo, existen otros factores que afectan la actividad antioxidante de los compuestos fenólicos totales, como el número y posición de grupos hidroxilo, la presencia de azúcares unidos a ellos y el grado de polimerización (Leyva, 2009).

Uno de los principales problemas al procesar productos de origen vegetal es la susceptibilidad que presentan al pardeamiento enzimático. Éste fenómeno sucede como consecuencia de la oxidación de los polifenoles, el cual afecta negativamente los atributos de color, sabor, aroma y valor nutricional. Se estima que más del 50% de los frutos comercializados se pierden por este motivo (Whitaker & Lee, 1995).

El método que comúnmente se ocupa para prevenir el pardeamiento enzimático tanto en bebidas como en alimentos en la industria es el uso de agentes antipardeamiento como los sulfitos. No obstante, la FDA (Food and Drug Administration) ha prohibido el uso de sulfitos en ciertos alimentos debido a los riesgos que presentan para la salud para un sector de consumidores (asmáticos) (Chi-Tang, 1992; Vally & Thomson, 2001).

Existen varios sistemas de extracción por disolventes para obtener fitoconstituyentes de productos naturales. Los métodos convencionales, que incluyen maceración, percolación,

calentamiento bajo reflujo, extracción con disolvente a temperatura ambiente y la extracción mediante Soxhlet, se usan habitualmente en la extracción de compuestos de productos de origen vegetal, pero tiene muchas desventajas y limitaciones. Además, los procedimientos de extracción convencionales requieren tiempo; por ejemplo, la maceración dura hasta 7 días, Soxhlet 24 horas, extracción con disolvente 2 días, donde se mezclan grandes cantidades de disolventes orgánicos peligrosos para la salud y el medio ambiente, difíciles de eliminar completamente, costosos, requieren alta pureza del disolvente, tiene baja selectividad de extracción y descomposición térmica de compuestos termolábiles (Easmin *et al.*, 2015).

Uno de los métodos más utilizados para determinar compuestos fenólicos totales es el método Folin-Ciocalteu (F-C). Se trata de un método colorimétrico basado en reacciones de transferencia de electrones entre el reactivo F-C y los compuestos fenólicos.) (Martínez-García *et al.*, 2010).

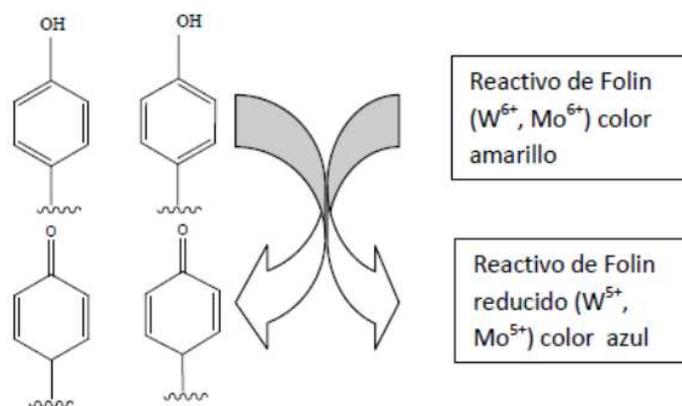


Figura 8. Reacción química entre el reactivo de Folin-Ciocalteu y la especie oxidante

### 1.3.3. Importancia de la presencia de antioxidantes en el betabel

Como parte del envejecimiento normal del organismo humano se producen un número considerable de sustancias químicamente inestables, llamadas especies reactivas de oxígeno que en su mayoría son radicales libres. El daño oxidativo que estas especies pueden producir en las células es de consecuencias críticas para su función, por lo que se le asocia con el desarrollo de numerosas patologías y enfermedades degenerativas como el cáncer y la diabetes. Además de las defensas endógenas del organismo contra el daño oxidativo (enzimas y coenzimas superóxido dismutasas, catalasa, peroxidasas GSH y el ácido úrico), la ingesta de moléculas antioxidantes puede neutralizar la producción y exposición a los radicales libres y disminuir los efectos adversos de las especies reactivas del oxígeno en el cuerpo humano.

Los antioxidantes de origen exógeno pueden ser de naturaleza diversa, como la vitamina C y E, carotenoides, polifenoles, principalmente. Estos difieren unos de otros tanto en su mecanismo como en su sitio de acción. Existe evidencia científica de que los compuestos antioxidantes de frutas y vegetales pueden prevenir el daño oxidativo en las células, con lo que se reduce el riesgo de cáncer, enfermedades cardiovasculares, neurodegenerativas y diabetes, entre otras (Sumaya-Martínez *et al.*, 2010).

### 1.3.4 Nuevas tendencias en el desarrollo de alimentos funcionales

- Microencapsulación

Este tipo de tecnología previene el deterioro de los compuestos bioactivos, se basa en el efecto de inclusión de una matriz polimérica. En esta matriz (cápsula) se crea un microambiente capaz de controlar las interacciones tanto internas como externas. Es importante tener en cuenta que la cápsula debe proteger y mantener las características del

compuesto bioactivo. Algunos compuestos encapsulantes utilizados en equipos de secado por aspersión son biopolímeros como almidón, hidrocoloides, proteína de suero, gelatinas y maltodextrinas.

La microencapsulación mejora las características tecnológicas de los polvos, por ejemplo, morfología, tamaño, vida de anaquel y propiedades antioxidantes (Betoret *et al.*, 2011).

- Impregnación de matrices alimenticias

Son una de las herramientas más utilizadas para el desarrollo de productos enriquecidos. La técnica consiste en incorporar compuestos bioactivos, agentes antimicrobianos o solutos para aumentar la vida de anaquel del producto, así como mejorar sus características nutricionales. La efectividad de la impregnación de las matrices alimenticias se ve afectada en gran medida por factores relacionados con su microestructura (porosidad, tamaño, forma del poro, tipo de solución), el periodo de impregnación y la temperatura (Chiralt *et al.*, 2001).

## 1.4 Incorporación de compuestos bioactivos a matrices alimenticias

Los alimentos funcionales van más allá de cumplir con los requerimientos nutricionales establecidos comúnmente, puesto que brindan la posibilidad de mejorar el estado de salud y/o prevenir el riesgo de enfermedades crónico-degenerativas. En la actualidad existe una amplia gama de alimentos funcionales los cuales han invadido enormemente el mercado. Algunos ejemplos son: alimentos para bebés, productos de panadería, cereales, confitería, lácteos, snacks, bebidas energéticas, bebidas deportivas, etc., por lo que las tecnologías emergentes para el desarrollo de este tipo de alimentos están utilizando la incorporación de compuestos bioactivos con la finalidad de ofrecer otra opción a los consumidores.

La incorporación de compuestos bioactivos (antioxidantes, vitaminas, minerales, probióticos, etc.) ya sea al vacío o a presión atmosférica es una de las formas más viables

debido a que puede ser utilizada en diferentes matrices tales como frutas y verduras. Se ha observado que en este tipo de matrices los ingredientes funcionales han sido incorporados con éxito. Esto es debido a que los tejidos vegetales están compuestos por sistemas multifásicos con una microestructura interna formada por células, espacios, capilares y poros. El principal tipo de tejido es el parénquima, que es donde se almacenan los nutrientes importantes para el hombre. Asimismo, el parénquima puede alojar una cantidad importante de aire, lo cual incide sobre los procesos de impregnación. Algunas estimaciones del espacio de aire en el tejido parenquimatoso se encuentran para manzana del 20-25% del volumen total, 15% en durazno, 37-45% en seta y el 1% en papa (Alzamora *et al.*, 2005).

Durante la impregnación a presión atmosférica, la célula vegetal actúa como una membrana semipermeable por donde el componente bioactivo es transferido desde la solución concentrada a la célula por un proceso de difusión. Este tipo de tratamiento deshidrata parcialmente al alimento sin alterar la estructura natural (Adsare *et al.*, 2016).

### 1.4.1 Deshidratación osmótica

La transferencia de masa consiste en un proceso de transporte de agua contenida en el alimento mediante la inmersión en una solución acuosa concentrada (salmuera o jarabe), donde la fuerza impulsora requerida para el flujo del agua es la diferencia del potencial químico entre la dilución y el fluido intracelular (Rahman, 2003). Durante este proceso se llevan a cabo dos fenómenos de forma simultánea, por un lado, la eliminación de agua y por otro la impregnación de solutos en la matriz alimenticia. En tejidos vegetales se encuentran membranas celulares, las cuales están compuestas por células de parénquima, las cuales permiten el libre paso de las moléculas del disolvente y también el paso de algunas moléculas de soluto, pero en menor grado. Las cinéticas de la deshidratación se determinan estimando

la velocidad de eliminación de agua y la ganancia de sólidos. La fuerza impulsora para la transferencia de masa radica en la diferencia del potencial químico entre la membrana semipermeable del producto y la solución osmótica. Es importante tomar en cuenta que este proceso de deshidratación se ve afectado por la estructura biológica y las características de los tejidos (Sharman, 2003). Debido a la naturaleza del proceso el contenido de humedad que se obtiene no es tan bajo como para ser comercializado debido a su baja estabilidad. Normalmente debe someter a los productos osmodeshidratados a algún método de secado por aire, congelación o vacío para que sea considerado como comercialmente estable. Esta combinación permite, aumentar la vida útil y mejorar las características sensoriales de los productos tratados (Levi *et al.*, 1983; Molano *et al.*, 1996). Asimismo, al incorporar los compuestos bioactivos bajo esta metodología no es necesaria una inversión costosa en cuanto a equipos, así como del uso de sustancias de origen natural y de fácil adquisición en el mercado (sacarosa, fructuosa, entre otras).

Para que se lleve a cabo la deshidratación osmótica es importante considerar tanto la fuerza de flujo como la resistencia del producto puesto que impactan directamente la disminución de la humedad como el aumento de sólidos. Algunas de las variables que pueden afectar a estos parámetros se muestran en las siguientes secciones.

### A. Materia prima

La fruta debe presentar una estructura celular rígida o semi rígida que se pueda cortar en las diversas geometrías (trozos, cubos, tiras o rodajas), puesto que se ha observado gran variabilidad del intercambio sólidos y agua entre frutas. Es importante resaltar que esta variabilidad también está presente tanto en especies de frutas como en variedades de una misma especie (Maestrelli, 1997).

### B. Tipo de solución osmótica

La solución hipertónica, la cual está definida por tener mayor concentración de soluto en el medio externo que en el producto a deshidratar, por lo que existe una pérdida de agua debido a la diferencia de presión; debe ser compatible con los alimentos, por ejemplo, sacarosa, jarabes concentrados, preparados a partir de azúcares. También se han utilizado soluciones de sacarosa-almidón, de azúcar invertido con glicerol o cloruro de calcio, de lactosa, glucosa con glicerol entre otros. Todo dependerá de la disponibilidad y la rentabilidad del soluto para llevar a cabo la deshidratación osmótica (Molano *et al.*, 1996).

Al utilizar diferentes combinaciones se puede obtener la máxima pérdida de humedad, las mejores propiedades sensoriales, la mayor ganancia de sólidos y el menor costo de solución. Es importante mencionar que la posibilidad de que el soluto de la solución entre en la fruta dependerá de la permeabilidad de las membranas del soluto. Por lo general los tejidos de las frutas no permiten el ingreso de sacarosa por el tamaño de la molécula, aunque si pueden dejar salir de la fruta moléculas más sencillas como ciertos ácidos o compuestos aromaticos (Camacho 1994).

### C. Concentración de la solución osmótica

El efecto ya sea de soluciones de sacarosa o sal en un sistema estático depende de las diferentes relaciones (fruta:solución) para mantener constantes los coeficientes de difusión involucrados en la transferencia de masa durante la impregnación de la matriz. En este sentido se denominan dos fenómenos: 1) impregnación donde a bajas concentraciones la ganancia de sólidos es mayor que la pérdida de agua; 2) deshidratación donde a medida que aumenta la concentración de la solución osmótica la ganancia de sólidos alcanza su máximo valor antes de disminuir y volverse inferior a la pérdida de agua (Palou *et al.*, 1993).

### D. Temperatura

El intercambio de masa aumenta a medida que se eleva la temperatura. Aunado a eso, al utilizar altas temperaturas se modifica la estructura del tejido de la matriz, se favorece la impregnación y por lo tanto la ganancia de sólidos (Panadés, 1996).

### E. Velocidad de la solución con respecto al producto

Los coeficientes de difusión tanto para la pérdida de agua como para la ganancia de sólidos dependen del movimiento relativo que exista entre la solución y el producto a deshidratar, se ha encontrado que por medio de la circulación de la solución, de concentración constante, el valor del coeficiente de difusión para la pérdida de humedad es aproximadamente 25% mayor y 16% menor para la ganancia de sólidos en comparación con el proceso en el cual la solución permanece estática (Palou *et al.*, 1993).

## 1.4.2 Modelos de deshidratación osmótica

Los modelos son comúnmente utilizados para diseñar u optimizar el proceso de secado y así poder aumentar la calidad del producto disminuyendo los costos de operación. Asimismo, sirven como una herramienta con la cual se puede predecir, analizar y representar el comportamiento de datos experimentales obtenidos del proceso de secado. Por su parte se han desarrollado modelos matemáticos que representan el fenómeno de deshidratación osmótica los cuales son reproducibles y extrapolables. No obstante, las correlaciones son limitadas para un cierto número de condiciones y variables, por lo que no responden adecuadamente a todas las variables que intervienen en el proceso. El modelo por excelencia para el proceso de deshidratación osmótica a presión atmosférica es el de Crank; este modelo consiste en una solución de la ley de Fick en estado no estacionario representado el

mecanismo de difusión (Crank, 1975). En cuanto a modelos empíricos y semiempíricos algunos de los más comunes se encuentran en la Tabla 10.

Tabla 10. Modelos empíricos y/o semiempíricos para el proceso de deshidratación osmótica

Modelo	Ecuación	Referencia
Magee	$\frac{C - C_{\infty}}{C_o - C_{\infty}} = kt^{0.5} + k_o$	(Giraldo <i>et al.</i> , 2003)
Peleg	$\frac{1}{Y - Y_t} = k_1 + k_2 t$	(Peleg, 1998)
Azuara	$\frac{1}{PA} = \frac{1}{S \cdot PA_{\infty}} + \frac{t}{PA_{\infty}}$	(Azuara <i>et al.</i> , 1992)
Raoult-Wack	$PA = a_1(1 - e^{-k_1 t})$	(Raoult-Wack, Guilbert, Maguer, & Ríos, 1991)

El transporte de masa del soluto y agua en estado no estacionario durante la deshidratación osmótica de un producto isotrópico se puede expresar a través de la segunda ley de Fick de la difusión en estado no estacionario como la siguiente expresión:

$$X_t = X_e \left[ 1 - 8\pi^{-2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n-1)^{-2} \exp \left[ -(2n-1)^2 4^{-1} \pi^2 DL^{-2}t \right] \right] \quad (1)$$

Donde  $X$  representa la pérdida de agua o ganancia de sólidos;  $D$  es el coeficiente de difusión del agua o soluto ( $m^2/s$ ), según sea el caso;  $L$  es la longitud característica de difusión (m),  $t$  es el tiempo (s) y el subíndice  $e$  representa el equilibrio.

Algunas de las consideraciones hechas para el desarrollo de la ecuación anterior son: (1) proceso isotérmico, (2) el producto no se encoge ni se deforma, (3) propiedades físicas del producto constantes, (4) transporte unidimensional de masa (en coordenadas rectangulares),

(5) dilución despreciable de la solución osmótica y (6) equilibrio másico instantáneo entre el producto y la solución osmótica.

## 2. Metodología

En el siguiente diagrama (Figura 9) se presenta de forma general el orden de la realización del proyecto organizado en tres etapas, las cuales se detallarán más adelante.

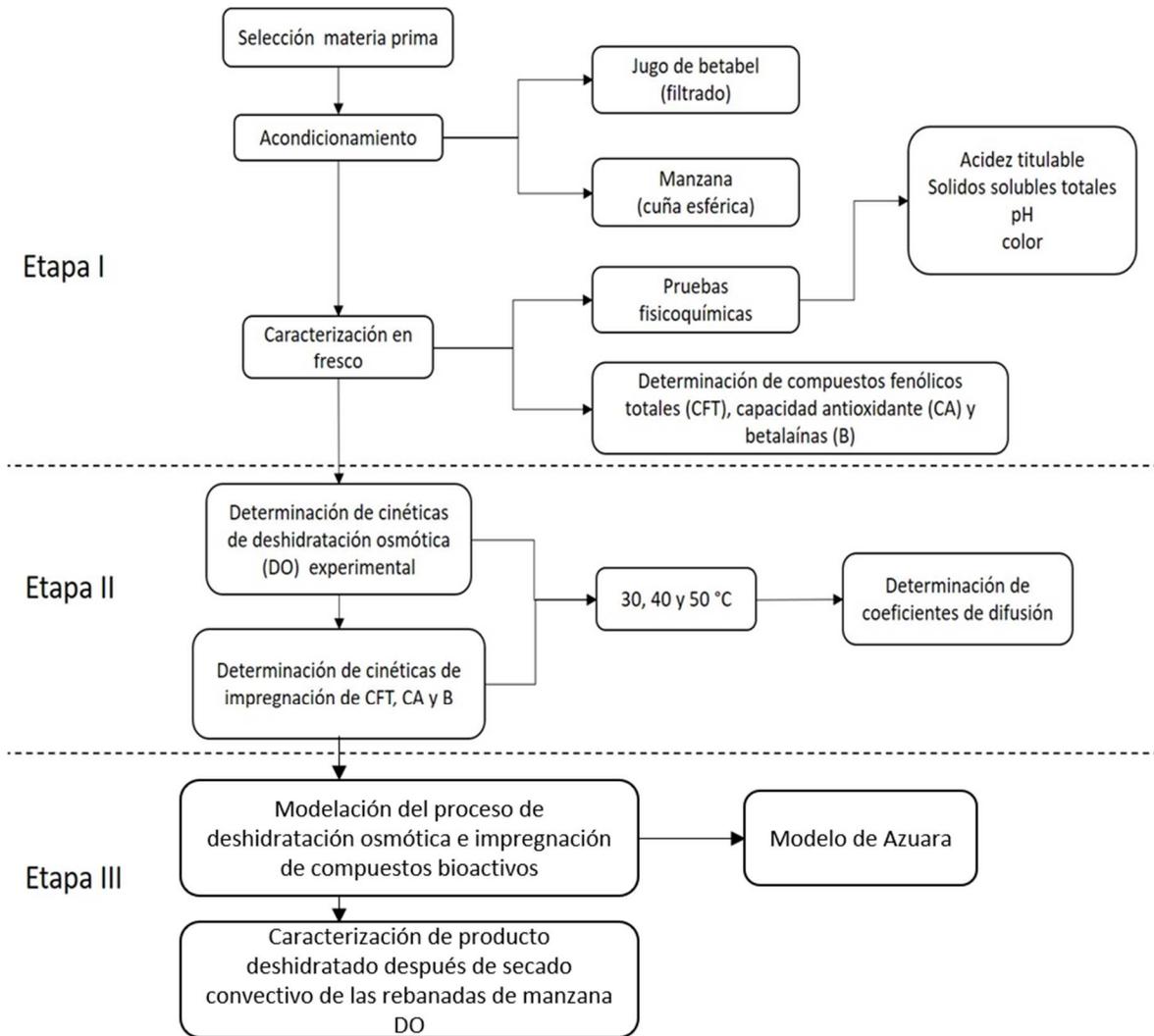


Figura 9. Diagrama del desarrollo de la metodología

## 2.1 Selección de materia prima

---

### 2.1 Selección de materia prima

Se empleó manzana (*Malus domestica* L. var. Granny Smith) (Figura 10a) y betabel (Figura 10b) (*Beta vulgaris* L.) adquiridos en un supermercado local. Se utilizaron estos productos debido a que mantienen una calidad regular y disponibilidad a lo largo del año.

La selección de la fruta se realizó en base a su índice de madurez descartando aquella que presentara deterioro físico, golpes o signos de crecimiento microbiano.



**a)**



**b)**

Figura 10. Materia prima utilizada: a) manzana y b) betabel

#### 2.1.1 Elaboración de jugo de betabel

El jugo se extrajo de los tubérculos, previamente lavados y desinfectados, por medio de un extractor (T-Fal, Francia). Enseguida el extracto se filtró tres veces, la primera con papel filtro (# 4) y las dos siguientes con algodón para disminuir el contenido de pulpa que llegara a presentar el extracto (Figura 11). Posteriormente, se estandarizaron los sólidos solubles a 50 °Brix con sacarosa. El jugo se almacenó en refrigeración a 4 °C en botellas ámbar para evitar deterioro por efectos de la luz hasta su uso.



Figura 11. Filtrado del jugo de betabel

### 2.1.2 Geometría de la manzana

Las manzanas se lavaron, pelaron y cortaron en forma de cuña esférica (gajos) procurando mantener las mismas dimensiones con un cortador de manzanas como se muestra en la Figura 12. Las muestras fueron pesadas, etiquetadas y almacenadas en refrigeración (4°C) hasta su uso. Los cortes sobrantes se utilizaron para determinar el contenido de humedad inicial por el método de secado en horno (AOAC, 1997).

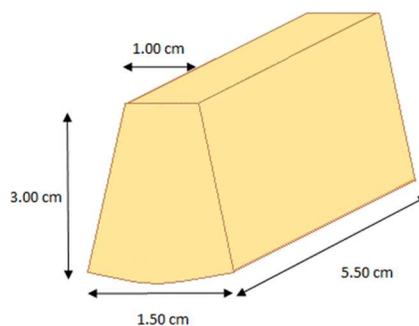


Figura 12. Dimensiones y geometría de la matriz de manzana

### 2.2 Caracterización fisicoquímica de manzana y jugo de betabel

Se realizó la caracterización fisicoquímica de la manzana, evaluando las siguientes características: pH, sólidos solubles totales, acidez titulable y color.

#### 2.2.1 pH

Para la medición de pH se utilizó un potenciómetro digital (Denver Instruments, Estados Unidos), previamente calibrado con buffer pH 4 y buffer pH 7. Enseguida se introdujo el electrodo en las muestras, se esperó cierto tiempo para que se equilibrara la medición y se leyó el valor de pH.

#### 2.2.2 Sólidos solubles totales

Los sólidos solubles se expresaron como °Brix, se determinaron con un refractómetro digital (Atago, España) a 25°C de acuerdo con la norma NMX-FF-0.15-1982. Se colocó una porción de muestra en el refractómetro previamente calibrado con agua destilada, posteriormente se leyeron los valores.

#### 2.2.3 Acidez titulable

La determinación se realizó por titulación conforme a la norma NMX-F-102-S-1978, con una solución valorada de hidróxido de sodio al 0.1 N (Sigma Aldrich). Para la determinación en manzana se pesaron 6 g de muestra, se licuaron y se filtraron. En seguida el filtrado fue transferido a un matraz Erlenmeyer donde se diluyó con 50 mL de agua. Con respecto al jugo de betabel al ser una muestra líquida se midieron 10 mL que igualmente fueron transferidos a un matraz Erlenmeyer. Enseguida para ambos casos se introdujo el electrodo a la muestra manteniendo agitación moderada y se agregó la solución 0.1 N de hidróxido de sodio en

## 2.2 Caracterización físico y química de la manzana y jugo de betabel

---

porciones de 4 gotas a la vez hasta alcanzar un pH de 8.3-8.7. Se anotó la lectura en gramos de ácido predominante del producto por cada 100 g o 100 mL de éste. Para manzana el valor utilizado fue 0.006704 g de ácido málico anhidro y para jugo 0.006406 g de ácido cítrico anhidro.

### 2.2.4 Color

Se colocaron las muestras de manzanas y betabel en el equipo (Colorímetro digital HP200, Estados Unidos) (Figura 13) en la escala de reflectancia se determinaron los parámetros  $L$ ,  $a^*$  y  $b^*$  en el sistema Hunter. A partir de las lecturas se calcularon los siguientes parámetros: tonalidad ( $H$ ), croma o pureza de color ( $C$ ) definidas por:



Figura 13. Colorímetro digital

### 2.3 Obtención de los extractos de las muestras sólidas

---

$$H = \arctan \frac{b}{a} \quad (2)$$

$$C = \sqrt{(a^2 + b^2)} \quad (3)$$

#### 2.3 Obtención de los extractos de las muestras sólidas

Se registró el peso de un gajo de manzana y se licuó con 50 mL de agua destilada. La mezcla se homogeneizó durante un minuto en una licuadora (Oster). Enseguida, se filtró 2 veces con algodón (Figura 14). Cada muestra se almacenó en frascos ámbar a temperatura de refrigeración (4 °C).



a)



b)

Figura 14. a) Proceso de molido y b) filtrado de los gajos deshidratadas osmóticamente con jugo de betabel

## 2.3 Obtención de los extractos de las muestras sólidas

### 2.3.1 Determinación de compuestos fenólicos totales

La cuantificación se realizó mediante la reacción colorimétrica del reactivo de Folin-Ciocalteu (Sigma Aldrich). A 1 mL de extracto se le adicionó 1 mL de reactivo Folin-Ciocalteu 0.1 M en un tubo de ensayo (forma de preparación de reactivos ver Anexo). La mezcla se dejó reposar por 3 minutos a temperatura ambiente en oscuridad, después se agitó en un vortex durante 15 segundos a velocidad baja. Pasado ese tiempo, a la mezcla anterior se le adicionó 1 mL de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 0.5% (Anexo) que se incorporó mediante succión con micropipeta. La mezcla se dejó reposar 30 min y se agitó antes de leer en el espectrofotómetro (Thermo Spectronic, Estados Unidos). La absorbancia de la muestra y de los estándares se leyeron a 760 nm. usando un espectrofotómetro UV-Vis. Al blanco de la muestra y del estándar se le adicionó agua destilada en lugar de reactivo de Folin-Ciocalteu. Para la curva de calibración se utilizó ácido gálico (Sigma Aldrich) como estándar y a partir de ella se obtuvo el contenido de fenoles totales expresados como mg equivalentes de ácido gálico (GAE/ 100g de materia seca). Todas las determinaciones se realizaron por triplicado (Figura 15).



Figura 15. Material para realizar las determinaciones compuestos fenólicos totales

### 2.3.2 Determinación de capacidad antioxidante DPPH + (2,2-difenil-1-picrilhidracilo)

La actividad anti-radical se adaptó del método de López-Martínez (2009). La reacción con el radical DPPH (Anexo) se llevó a cabo en tubos de ensayo a temperatura ambiente (25°C). A los extractos de las muestras se les adición 1 mL del radical DPPH, se agitaron en un vortex por 15 segundos y se dejaron reposar durante 30 min. La disminución en la absorbancia del DPPH fue medida a 517 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (Thermosonic, Estados Unidos). Se utilizó etanol como blanco, así como Trolox (0.002 mM) como un control positivo antioxidante y el control se formuló con una mezcla de 1 mL de DPPH y 1 mL de etanol. Los resultados fueron expresados como mg de Trolox (mg Trolox/100 g muestra húmeda). La capacidad antioxidante se expresó como mg Trolox utilizando el % de inhibición de la siguiente manera:

$$\% \text{ inhibición} = \left[ \frac{A_0 - A_t}{A_0} \right] \times 100 \quad (4)$$

### 2.3.3 Determinación de betalaínas totales

Para la cuantificación de betalaínas se utilizó la metodología propuesta por Stintzing *et al.* (2007). Se diluyeron los extractos de las muestras con agua y 1 mL de Buffer Mcilvaine (pH 6.5, citrato-fosfato) para obtener los valores de absorción en un rango de 0.9-1.0. Los contenidos de betacianinas y betaxantinas fueron medidos a una longitud de onda de 538 y 480 nm, respectivamente en un espectrofotómetro UV-Visible (Thermo Spectronic, Estados Unidos). En seguida, se calculó el contenido de betalaínas totales para cada muestra, mediante adición aritmética.

Para determinar el contenido de betalaínas se utilizó la siguiente fórmula:

$$BC = \left[ \frac{A \cdot DF \cdot MW \times 10^6}{(\varepsilon \cdot l)} \right] \quad (5)$$

Donde CB es el contenido de betalaínas (mg/L), A es la absorbancia, DF es el factor de dilución, l es el tamaño de la celda (1 cm),  $\varepsilon$  es el coeficiente de extinción molar (betacianina es de 60000 L/mol·cm y betaxantina es de 48000 L/mol·cm) y MW es el peso molecular (betacianina 550 g/mol y betaxantina 305 g/mol).

### 2.4 Deshidratación osmótica de la matriz de manzana

El montaje del experimento consistió en colocar las muestras previamente etiquetadas, para poder ser reconocidas entre las placas perforadas dentro del vaso de precipitados como se observa en la Figura 16; posteriormente se sumergió en la solución hipertónica en una proporción en peso 1:15 (manzana: solución) para garantizar que la muestra permanezca en todo momento en contacto con la solución, así como para evitar su dilución excesiva durante el proceso (consideración de concentración constante de solución osmótica). Previamente, al vaso se le colocó un agitador magnético para mantener el nivel de agitación constante (670 rpm). Este tratamiento se llevó a cabo de forma independiente por triplicado, tanto para la obtención de la cinética de deshidratación osmótica como para la cinética de impregnación de compuestos.

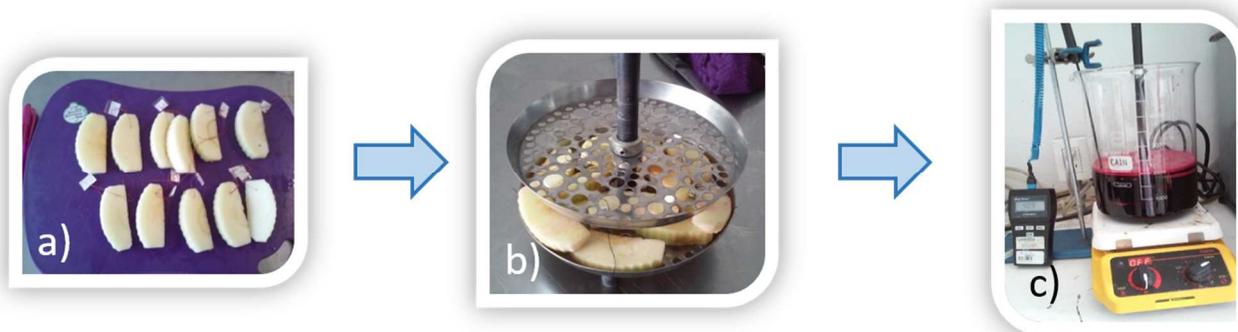


Figura 16. Sistema osmodeshidratación de manzanas: a) manzanas etiquetadas, b) rejilla para mantener sumergidas las manzanas y c) sistema de osmodeshidratación con jugo de betabel

### 2.4.1 Determinación de cinéticas de deshidratación

Para obtener las cinéticas de deshidratación osmótica se retiraron una a una las muestras (15 muestras) a determinados intervalos de tiempo, cada 10 min la primera hora, 15 min la segunda hora, 30 min la tercera hora y cada hora hasta alcanzar el equilibrio (Figura 17d).

El experimento se llevó a cabo a tres temperaturas (30, 40, 50 °C). Como solución hipertónica se utilizó para el control una solución de sacarosa a 50 °Brix y otra con jugo de betabel estandarizado con sacarosa a 50 °Brix. Una vez retiradas de la solución, cada muestra fue secada con papel absorbente y se registró su masa. Después las manzanas impregnadas se colocaron en una estufa a 105°C hasta alcanzar peso constante (Figura 17e y 17f).



Figura 17. Determinación experimental de cinéticas de osmodeshidratación

Finalmente, se determinó el contenido de humedad del producto fresco y el osmodeshidratado. La humedad del producto en base húmeda fue determinada con la siguiente ecuación:

$$Y_o = \frac{m_o - m_1}{m_o} \quad (6)$$

Para determinar la humedad del producto osmodeshidratado en base húmeda a diferentes tiempos ( $Y^{DO}$ ) se utilizó la siguiente ecuación:

$$Y_o^{DO} = \frac{m_o^{DO} - m_1^{DO}}{m_o^{DO}} \quad (7)$$

Los datos obtenidos fueron utilizados para calcular la pérdida de agua y ganancia de sólidos. Para determinar la pérdida de agua (PA) fue necesario determinar la cantidad de agua pesada en las muestras antes ( $m_o^{DO}$ ). La masa de agua presente en cada una de las muestras

del tratamiento de deshidratación osmótica ( $m_w$ ) se determinó a partir de su masa inicial ( $m_i$ ) y humedad ( $Y$ ) como se muestra a continuación:

$$m_w = m_i Y \quad (8)$$

La masa de agua presente en cada una de las muestras después del tratamiento de deshidratación osmótica ( $m_w^{DO}$ ) se definió a partir de su masa ( $m_i^{DO}$ ) y humedad ( $Y^{DO}$ ):

$$m_w^{DO} = m_i^{DO} Y^{DO} \quad (9)$$

Finalmente, la pérdida de agua (PA) para cada tiempo se determinó con la siguiente ecuación:

$$PA = \frac{m_w - m_w^{DO}}{m_i} = \frac{\text{masa inicial de agua} - \text{masa final de agua}}{\text{masa inicial de producto}} \quad (10)$$

Donde ( $m_w$ ) es la masa inicial de agua, ( $m_a^{DO}$ ) es la masa final de agua, ( $m_i$ ) es la masa inicial del producto.

En cuanto a la determinación de la ganancia de sólidos (GS) fue necesario determinar la cantidad de sólidos presentes en las muestras antes ( $m_i$ ) y después del proceso de deshidratación osmótica ( $m_i^{DO}$ ). La masa de sólidos ( $m_s$ ) presente en cada una de las muestras antes del tratamiento de deshidratación osmótica se determinó a partir de la masa inicial ( $m_i$ ) y la masa de agua presente en cada una de las muestras antes del tratamiento de deshidratación osmótica ( $m_w$ ) como se muestra a continuación:

$$m_s = m_i - m_w \quad (11)$$

La masa de sólidos presentes en cada una de las muestras después del tratamiento de deshidratación osmótica ( $m_s^{DO}$ ) se determinó a partir de la masa inicial ( $m_i^{DO}$ ) y la masa de agua presente ( $m_w^{DO}$ ) de cada muestra después del tratamiento de deshidratación osmótica:

$$m_s^{DO} = m_i^{DO} - m_w^{DO} \quad (12)$$

Finalmente, la ganancia de sólidos (GS) se expresa como en la siguiente ecuación:

$$GS = \frac{m_s^{DO} - m_s}{m_i} = \frac{\text{masa final de sólidos} - \text{masa inicial de sólidos}}{\text{masa inicial de producto}} \quad (13)$$

### 2.5 Determinación de difusividad efectiva

Los coeficientes de difusión del agua y soluto en la matriz, así como en los niveles de deshidratación e impregnación en equilibrio fueron obtenidos mediante el ajuste de las curvas experimentales de PA y GS por medio de regresión no lineal, reorganizando la Ec. 12 en términos de concentraciones adimensionales, donde dicho término se calculó como:

$$\Psi = 1 - \frac{PA}{PA_{\infty}} \quad (14)$$

$$\Psi = 1 - \frac{GS}{GS_{\infty}} \quad (15)$$

### 2.5.1 Determinación de cinéticas de impregnación de compuestos bioactivos

Para llevar a cabo esta sección se aplicó la misma metodología que en las secciones 2.4 y 2.4.1. En ésta última en lugar de colocar las muestras extraídas a los diferentes tiempos establecidos, en la estufa, éstas se colocaron en bolsas tipo ziplock previamente etiquetadas con el tiempo de extracción de la solución hipertónica. Posteriormente fueron almacenadas a temperatura de congelación (-18 °C) hasta su uso. En cuanto a la realización de las determinaciones de compuestos fenólicos, capacidad antioxidante y betalaínas, primero se obtuvieron los extractos las muestras a los diferentes tiempos de extracción (congeladas) como se menciona en la sección 2.3. Enseguida se realizaron las determinaciones a los extractos como se muestra en las secciones 2.3.1 a 2.3.3

Con los datos obtenidos se generaron las cinéticas experimentales de impregnación de compuestos fenólicos totales, capacidad antioxidante y betalaínas.

### 2.5.2 Caracterización del producto deshidratado

Para llevar a cabo esta sección fue necesario realizar nuevamente la deshidratación osmótica de las manzanas (solución control y solución jugo) seguido de secado convectivo (Binder, Model 23, Alemania) para remover la humedad restante; se efectuó a tres temperaturas (60, 70, 80 °C) para observar el efecto de la temperatura sobre los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante incorporados durante el tratamiento de osmodeshidratación (Figura 18).



Figura 18. Gajos de manzana osmodeshidratadas con jugo de betabel a tres temperaturas

### 2.5.3 Obtención de los extractos de manzana control e impregnada

Al ser un producto deshidratado fue necesario moler las muestras con un molino de café (Oster), posteriormente se tamizó (tamiz No 40) para obtener un tamaño de partícula de 425 micrómetros (Figura 19).



Figura 19. Tamizado de la muestra molida

En seguida se pesaron 0.2 g de muestras pulverizadas a los cuales se les agregó 20 mL de agua destilada y se dejaron macerando con agitación media a temperatura ambiente por 12

## 2.6 Caracterización de los extractos del producto deshidratado

---

horas. Una vez pasado este periodo los extractos se filtraron con algodón y se almacenaron en frascos ámbar.

### 2.6 Caracterización de los extractos del producto deshidratado

Se utilizó la metodología de las secciones 2.3.1 a 2.3.3 los cuales describen los procedimientos para la obtención de compuestos fenólicos totales, capacidad antioxidante y contenido de betalainas.

### 2.7 Modelado de las cinéticas de osmodeshidratación e impregnación de compuestos bioactivos

Se utilizó el modelo empírico de Azuara et al. (1997), el cual surge a partir de un balance de masa basado en el ajuste de dos parámetros.

$$Y = Y_{\infty} - Y_s \quad (16)$$

Dónde:  $Y$  es la fracción de agua perdida de la matriz aun tiempo  $t$ ,  $Y_{\infty}$  es la fracción de agua perdida por la matriz en el equilibrio y  $Y_s$  es la fracción de agua que permanece dentro de la matriz a un tiempo  $t$ . Por lo tanto, el balance queda como se muestra a continuación:

$$\frac{t}{Y} = \frac{1}{kY_{\infty}} + \frac{1}{Y_{\infty}} \quad (17)$$

Acomodando los términos de la Ec. 17 en función de  $Y$ :

$$Y = \frac{k Y_{\infty} t}{1+k t} \quad (18)$$

## 2.6 Caracterización de los extractos del producto deshidratado

---

En la ecuación anterior se muestran los parámetros  $k$  y  $Y_{\infty}$ , los cuales pueden ser calculados cuando el tiempo tienda al infinito (equilibrio), mediante regresión lineal usando datos experimentales durante un periodo corto de tiempo los cuales seguirán el comportamiento de la Ec. 18. Esta ecuación, se puede generalizar para describir la extracción o impregnación de cualquier componente en un producto

### 3. Resultados y discusión

En esta sección se presentan primeramente los resultados obtenidos de la caracterización de manzana y betabel. Enseguida se presentan las cinéticas obtenidas experimentalmente de la pérdida de agua, así como de ganancia de sólidos tanto para la solución de sacarosa como para la solución de jugo de betabel ajustado con sacarosa. Posteriormente se presentan los resultados calculados para los coeficientes de difusión de agua, solutos, compuestos fenólicos, capacidad antioxidante, betalaínas totales (betaxantinas y betacianinas). Finalmente se encuentran las cinéticas modeladas utilizando el modelo de Azuara.

#### 3.1 Caracterización fisicoquímica en fresco de manzana y betabel

Los resultados obtenidos durante la caracterización de manzana (c.v. Granny Smith) y jugo de betabel se presentan en la Tabla 11.

El pH es uno de los parámetros utilizados como indicador de madurez, puesto que su valor tiende a aumentar a medida que el fruto madura con el tiempo. Como se observa en la Tabla 11 los valores obtenidos tanto para manzana como para betabel se encuentran dentro de lo reportado previamente con valores de 3.2 a 3.95 y 6.12 a 6.5, respectivamente (Pacheco-Estay, 2009; Thakur & Das Gupta, 2006; Naes *et al.*, 2015; Marszałek *et al.*, 2017). Es importante mencionar que existe una correlación negativa entre los valores de pH y de acidez titulable, puesto que, dependiendo del nivel de madurez la acidez titulable tenderá a disminuir a medida que el pH aumenta con respecto al paso del tiempo (Pinzón, Fischer, & Corredor, 2007).

Los contenidos de sólidos solubles totales (SST) obtenidos para manzana y betabel fueron similares a los reportados por diversos autores (Moreno *et al.*, 2007; Landl *et al.*, 2010). Como se sabe, los SST es otro parámetro que refleja madurez en los frutos; este se encuentra

asociado con los azúcares disueltos en el jugo celular, el cual se encuentra constituido de un 80 a 95% de azúcares (Casierra-Posada & Aguilar-Avendaño, 2008). Otra prueba que brindan más información acerca del estado de madurez de los frutos es la relación entre SST y la acidez titulable mejor conocida como índice de madurez. Esta relación es uno de los métodos mayormente utilizados para estimar el nivel de madurez de los frutos, ya que a medida que el fruto madura la cantidad de sólidos solubles tiende a aumentar mientras que la acidez disminuye (Pinzón *et al.*, 2007 ; Russián *et al.*, 2009).

Recientemente se ha reportado que una de las principales funciones de la determinación de color es utilizada para el rastreo o identificación de compuestos bioactivos presentes en los alimentos (Sant'Anna *et al.*, 2013). En este sentido los valores de los parámetros de color (L, a\* y b\*) obtenidos en la parte experimental para manzana se encuentran en el segundo cuadrante de la esfera CIELAB resultando en una coloración verde-amarilla ligeramente pálida; lo cual concuerda con lo reportado por Sant'Anna *et al.* (2013) en donde se hace mención de que los compuestos de oxidación de flavonoides presentes en manzana le dan esta coloración amarillo claro. Con respecto a los parámetros de color del betabel, se ubican en el primer cuadrante de la esfera CIELAB (coloración roja). Los valores coinciden con los reportados en literatura donde se menciona que los contenidos de betalaínas están relacionadas con el aumento en el color rojo de las muestras (Sant'Anna *et al.*, 2013).

Tabla 11. Caracterización físicoquímica de manzana y jugo de betabel

<b>Parámetro</b>	<b>Manzana</b>	<b>Jugo de betabel</b>
pH	3.5 ± 0.05	6.3 ± 0.03
Acidez titulable (% ácido málico)	0.5 ± 0.04	0.3 ± 0.01
Sólidos solubles totales (°Brix)	11 ± 0.58	12.9 ± 0.45
Índice de madurez	23.6 ± 0.75	48.9 ± 1.49
<i>L*</i>	77.4 ± 1.30	4.3 ± 0.74
<i>a*</i>	-5.2 ± 0.32	5.9 ± 4.60
<i>b*</i>	16.9 ± 0.66	1.1 ± 0.53
C (Croma)	16.8 ± 0.70	5.55 ± 4.70
h (Hue)	110.1 ± 1.03	11.4 ± 0.21

Se reportan las medias aritméticas (triplicado) con su respectiva desviación estándar para cada una de las lecturas.

En la Tabla 12 se muestran los valores obtenidos de la caracterización de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de manzana y betabel. De acuerdo a lo reportado por diversos autores los valores de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante son ligeramente menores tanto para manzana como para betabel (Francini & Sebastiani, 2013; Fu *et al.*, 2011; Wruss *et al.*, 2015; Vasconcellos *et al.*, 2016). Esto es debido a que sus componentes pueden variar en terminos cuantitativos y cualitativos. Estas variaciones son debidas a factores intrínsecos como el cultivo, la variedad y etapa de madurez, y factores extrínsecos como el clima y las condiciones del suelo, enfatizando que la efectividad de la capacidad antioxidante depende de la estructura química y concentración de los compuestos

fitoquímicos de los alimentos (Paixao *et al.*, 2007; Kalinowska *et al.*, 2014; Pirlak *et al.*, 2017). Sin embargo, es importante mencionar que se ha reportado que existen fuertes evidencias de que la fuente predominante de la capacidad antioxidante se deriva de los compuestos fenólicos presentes en los alimentos motivo, por el cual, se puede establecer la correlación que existe entre el contenido de fenoles totales y la capacidad antioxidante (Paixao *et al.*, 2007).

Tabla 12. Caracterización de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de manzana y betabel

<b>Parámetro</b>	<b>Manzana</b>	<b>Betabel</b>
Compuestos fenólicos totales (mg GAE/100 g)	42.67 ± 2.18	52.36 ± 2.20
Capacidad antioxidante (mg Trolox/100 g)	56.97 ± 0.76	303.8 ± 11.17
Betalaínas totales (mg/g)	NA	1284.9 ± 72.86
Betacianinas (mg/g)	NA	839.1 ± 41.59
Betaxantinas (mg/g)	NA	445 ± 33.98

Se reportan las medias aritméticas (triplicado) con su respectiva desviación estándar para cada una de las lecturas.

En cuanto a los valores de betalaínas determinados en la parte experimental se observó que son similares a los reportados en literatura; éstos representan la suma de betacianinas y betaxantinas presentes en betabel. De acuerdo con Paixao *et al.* (2007) las betalaínas se encuentran aproximadamente formadas por 60% de betacianinas y 40% de betaxantinas. Cazpski *et al.* (2009) demostraron que existe una correlación altamente significativa entre la capacidad antioxidante y el contenido del pigmento rojo. Por otro lado, el contenido total de betalainas representa del 70 al 100% del contenido fenólico total del betabel (Escribano *et al.*

., 2002; Wruss *et al.*, 2015). Sin embargo, se ha reportado que los contenidos de flavonoides y ácidos fenólicos en betabel son muy bajos en comparación con otros vegetales (Cazpski, Mikolajczyk, & Kaczmarek, 2009).

### 3.2 Pérdida de agua y ganancia de sólidos en equilibrio

En las Figuras 20 y 21 muestran la pérdida de agua (*PA*) y ganancia de sólidos (*GS*) en equilibrio que alcanzaron las cinéticas de los gajos de manzana después de 330 min durante el proceso de deshidratación osmótica utilizando diferentes soluciones osmóticas. A pesar de esto se observó el mismo efecto de la temperatura tanto en la pérdida de agua (*PA*) como en ganancia de sólidos (*GS*) después de los 200 min. Lo anterior se atribuye, que a medida que la temperatura es mayor, la viscosidad de la solución disminuye por lo que se ve favorecida la difusividad de la solución dentro de la rebanada de manzana (Jiménez-Hernández *et al.*, 2017). Asimismo, el cambio observado en la permeabilidad de la membrana celular durante el proceso de osmodeshidratación es atribuida al aumento de la temperatura, lo cual favorece la ganancia de sólidos (*GS*) en la matriz alimenticia (Dagde & Jacob Nmegbu, 2014; Jiménez-Hernández *et al.*, 2017).

Los valores en el equilibrio de pérdida de agua (*PA*) para los gajos de manzana tratadas con la solución de sacarosa fueron:  $0.41 \pm 0.05$  (30°C),  $0.36 \pm 0.02$  (40°C),  $0.56 \pm 0.07$  (50°C) y para jugo de betabel fueron:  $0.44 \pm 0.06$  (30°C),  $0.45 \pm 0.02$  (40°C),  $0.47 \pm 0.07$  (50°C) g agua perdida g<sup>-1</sup> producto fresco, respectivamente (Figura 20).

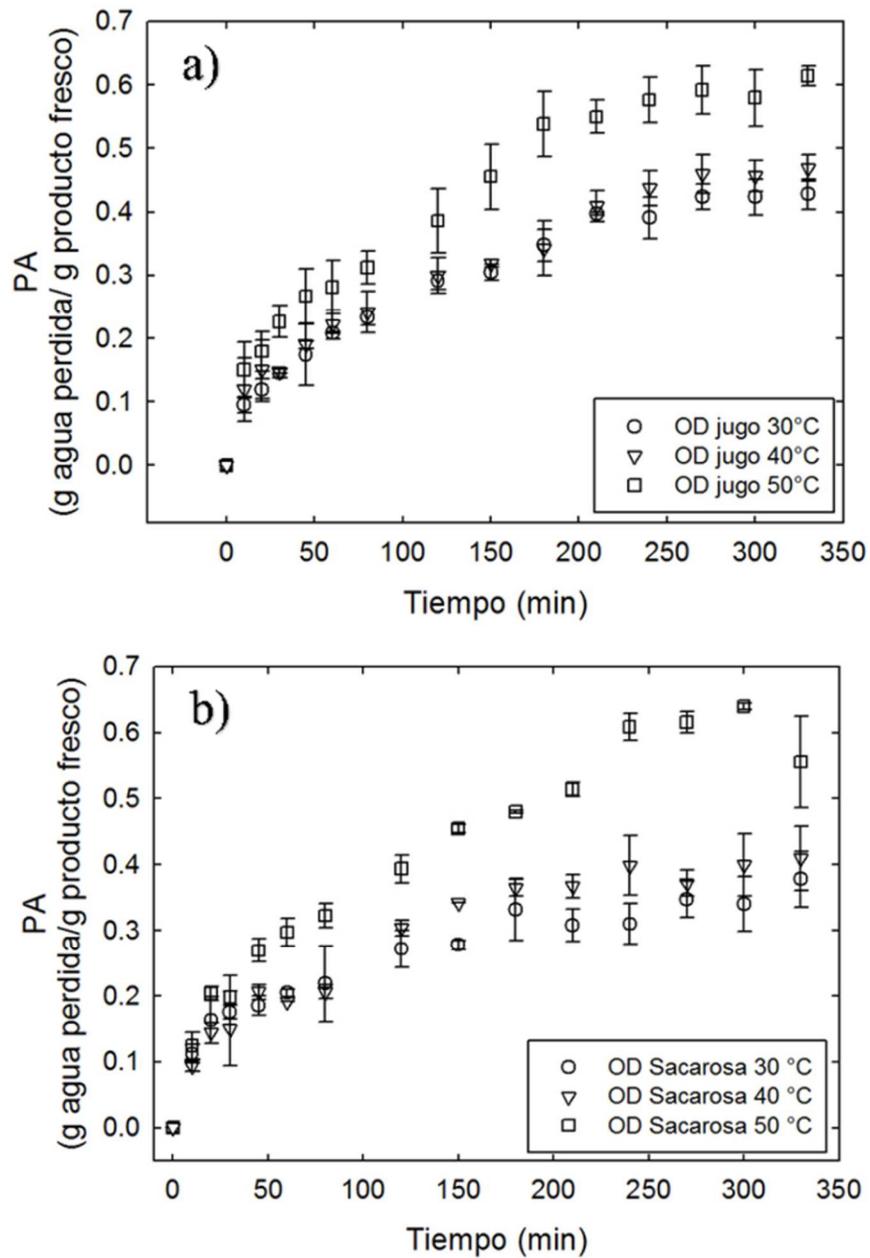


Figura 20. Cinéticas experimentales de la pérdida de agua (PA) en el proceso de deshidratación osmótica en gajos de manzana en: a) solución de sacarosa y b) jugo de betabel a tres temperaturas

En cambio, los valores de ganancia de sólidos para los gajos de manzana tratadas con la solución de sacarosa fueron:  $0.071 \pm 0.003$  (30°C),  $0.065 \pm 0.008$  (40°C),  $0.104 \pm 0.026$

### 3.2 Pérdida de agua y ganancia de sólidos en equilibrio

(50°C) y para jugo de betabel fueron:  $0.058 \pm 0.01$  (30°C),  $0.060 \pm 0.02$  (40°C),  $0.077 \pm 0.008$  (50°C) g solutos ganados  $\text{g}^{-1}$  producto fresco, respectivamente (Figura 21).

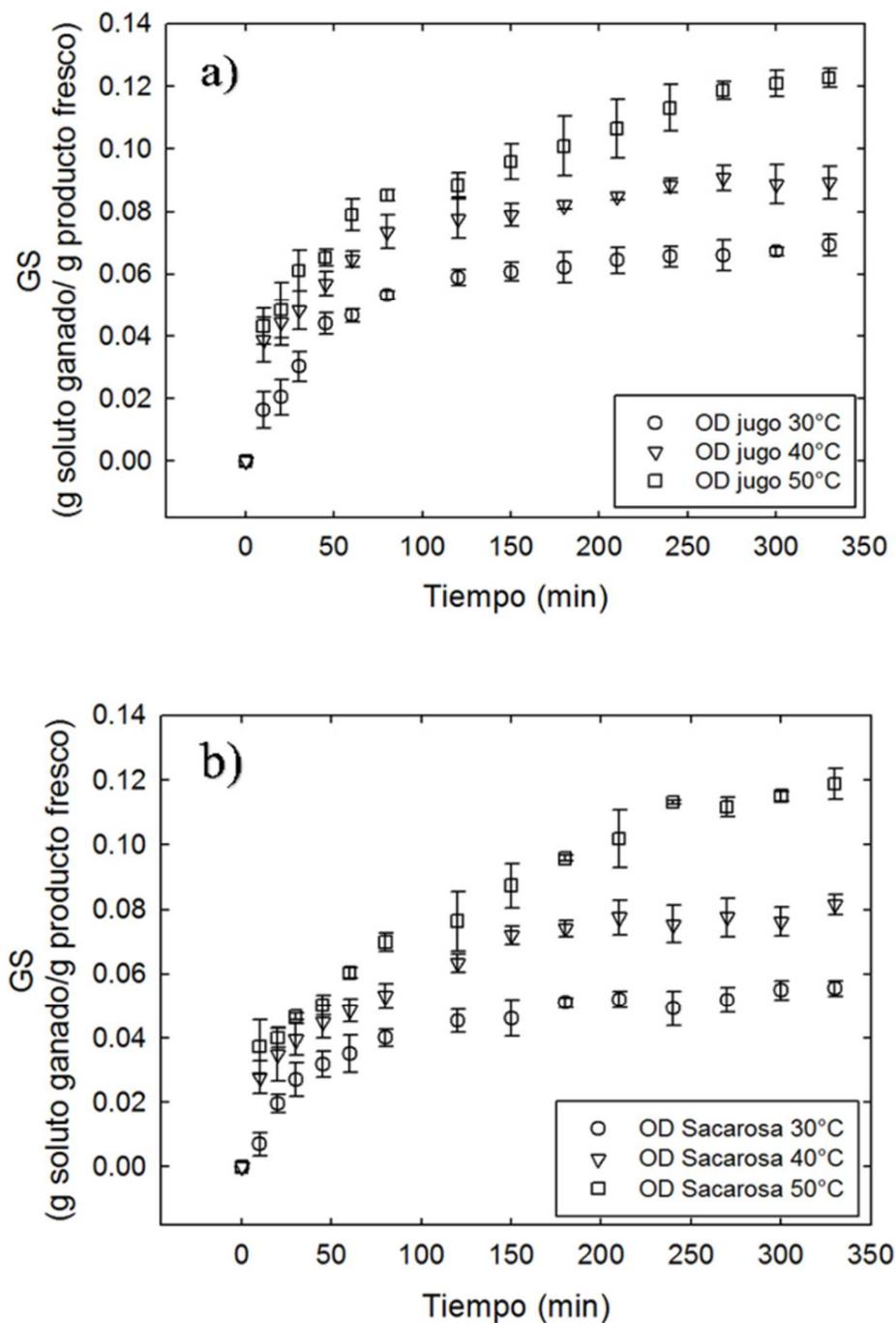


Figura 21. Cinéticas experimentales de la ganancia de sólidos (GS) en el proceso de deshidratación osmótica en gajos de manzana en: a) solución de sacarosa y b) jugo de betabel a tres temperaturas.

Tanto para pérdida de agua (*PA*) y ganancia de sólidos (*GS*) a pesar de utilizar las diferentes soluciones osmóticas se observó que poseen un potencial similar para la remover el agua, puesto que el azúcar predominante en el jugo de betabel es sacarosa, de allí su comportamiento similar (Jiménez-Hernández *et al.*, 2017). Asimismo, se observó una reducción de tamaño considerable de las muestras con respecto al tiempo de procesamiento en ambos tratamientos, lo cual se explica por el hecho de que la tasa de pérdida de agua es mucho mayor que la de ganancia de sólidos. Este comportamiento ocurre en el tejido deshidratado puesto que la permeabilidad selectiva de las membranas celulares permite el transporte de moléculas más grandes como la sacarosa, por lo tanto, reduce la difusión de la sacarosa a través del tejido celular (Silva, Fernandes, & Mauro, 2014).

### 3.2.1 Coeficientes de difusión de agua y sólidos

La Tabla 13 muestra los coeficientes de difusión que se calcularon durante la deshidratación osmótica de los gajos de manzana utilizando diferentes soluciones hipertónicas (solución sacarosa y jugo de betabel). Los coeficientes de difusividad para agua ( $D_w$ ) estuvieron en los rangos de  $1.37 - 1.61 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  (solución sacarosa) y  $1.69 - 2.03 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  (jugo de betabel); en cuanto a sólidos ( $D_s$ ) fueron:  $1.10 - 1.62 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  (solución sacarosa) y  $1.32 - 1.83 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  (jugo de betabel). Se observa que los valores de  $D_w$  son más altos que los de  $D_s$  para ambas soluciones osmóticas, esto es debido la pérdida de agua (*PA*) se lleva a cabo con mayor velocidad que la ganancia de sólidos (*GS*); puesto que el tamaño de la molécula de sacarosa es más grande y por lo tanto hace más lenta su transferencia desde la solución osmótica hasta el producto.

Tabla 13. Coeficientes de difusión de agua ( $D_w$ ) y ganancia de sólidos ( $D_s$ ) durante el proceso de deshidratación osmótica de manzana.

Temperatura (°C)	Sacarosa		Jugo de betabel	
	$D_w$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_s$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_w$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_s$ (m <sup>2</sup> /s)
30	1.37 x 10 <sup>-9</sup>	1.10 x 10 <sup>-9</sup>	1.69 x 10 <sup>-9</sup>	1.32 x 10 <sup>-9</sup>
40	1.59 x 10 <sup>-9</sup>	1.26 x 10 <sup>-9</sup>	1.90 x 10 <sup>-9</sup>	1.41 x 10 <sup>-9</sup>
50	1.62 x 10 <sup>-9</sup>	1.60 x 10 <sup>-9</sup>	2.03 x 10 <sup>-9</sup>	1.83 x 10 <sup>-9</sup>

Los valores calculados para los datos experimentales se encontraron en el orden de 10<sup>-9</sup>, estos son análogos a los reportados por otros autores. Khoyi y Hesari (2007) reportaron que el coeficiente de difusión varió de 1.066 × 10<sup>-9</sup> a 4.061 × 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s para pérdida de agua (*PA*) y 7.691 × 10<sup>-9</sup> a 3.127 × 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s para ganancia de sólidos (*GS*) de albaricoque en solución de sacarosa (Beristain *et al.*, 1990; Mundada, Singh Hathan, & Maske, 2011; Lucena Barbosa *et al.*, 2013).

### 3.2.2 Modelación de las curvas de pérdida de agua y ganancia de sólidos con diferentes soluciones osmóticas.

En las Figura 22 se muestran las cinéticas experimentales y modeladas de pérdida de agua (*PA*) durante el proceso de deshidratación osmótica de gajos de manzana a tres temperaturas con diferentes soluciones osmóticas. Se puede observar que existe una buena correspondencia entre las cinéticas experimentales y los valores predichos por el modelo de Azuara (sección 3.2.3). Uddin, Ainsworth, y Ibanoglu (2004) estudiaron la osmodeshidratación de rodajas de zanahoria con diferentes concentraciones de sacarosa mediante metodología de superficie de respuesta obteniendo para pérdida de agua un rango de 0.72 a 0.76 g agua perdida / g producto fresco.

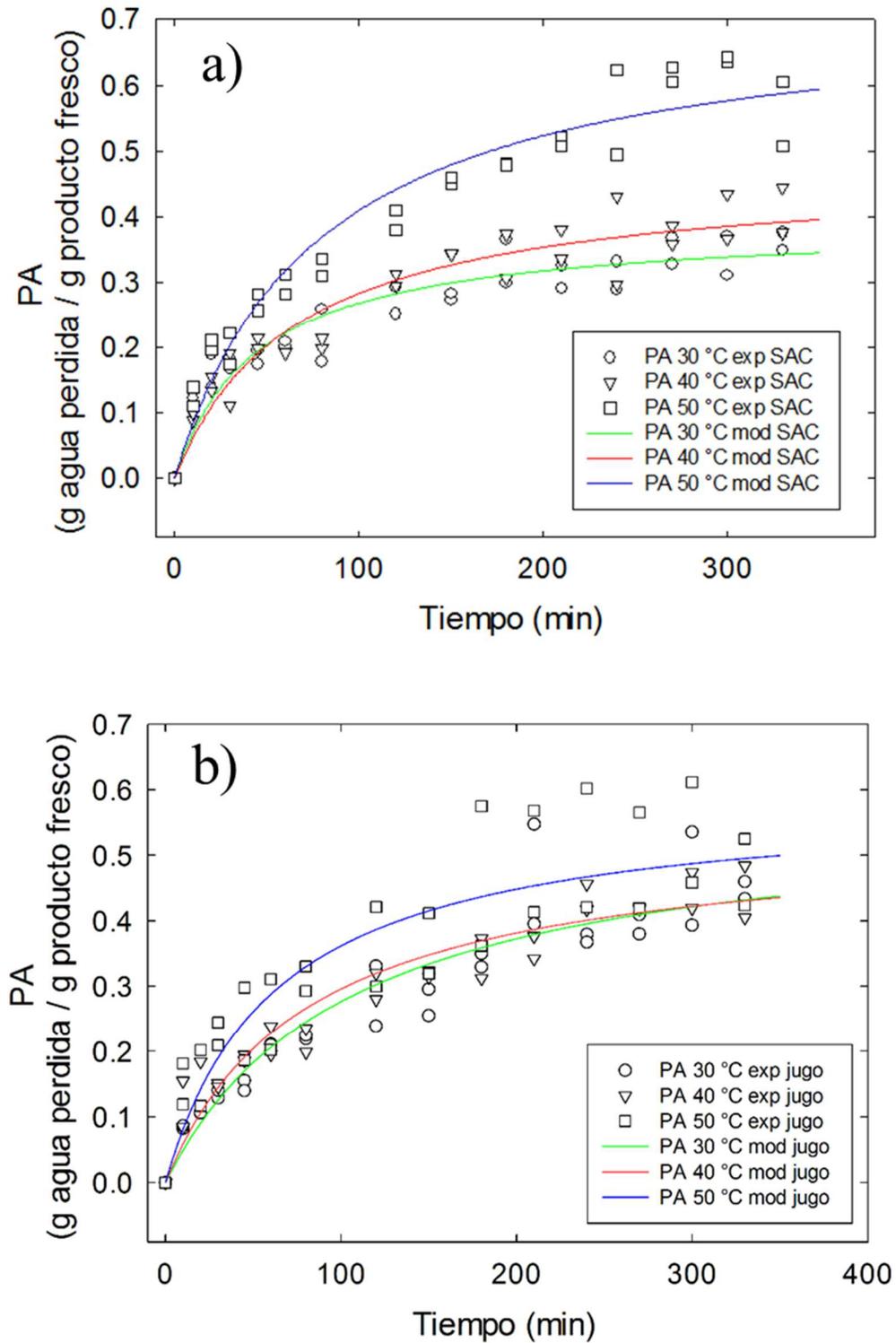


Figura 22. Cinética experimental y modelada de la pérdida de sólidos en el proceso de deshidratación osmótica de gajos de manzana: a) solución sacarosa y b) jugo de betabel.

En la Figuras 23 y 24 se muestran las cinéticas experimentales y modeladas de ganancia de sólidos (*GS*) durante el proceso de deshidratación osmótica de gajos de manzana a tres temperaturas con diferentes soluciones osmóticas. De igual forma, se observa que existe una buena correspondencia entre las cinéticas experimentales y los valores predichos por el modelo propuesto. Uddin, Ainsworth, & Ibanoglu (2004) estudiaron la osmodeshidratación de rodajas de zanahoria con diferentes concentraciones de sacarosa mediante metodología de superficie de respuesta obteniendo para pérdida de agua un rango de 0.14 a 0.18 g / g producto fresco.

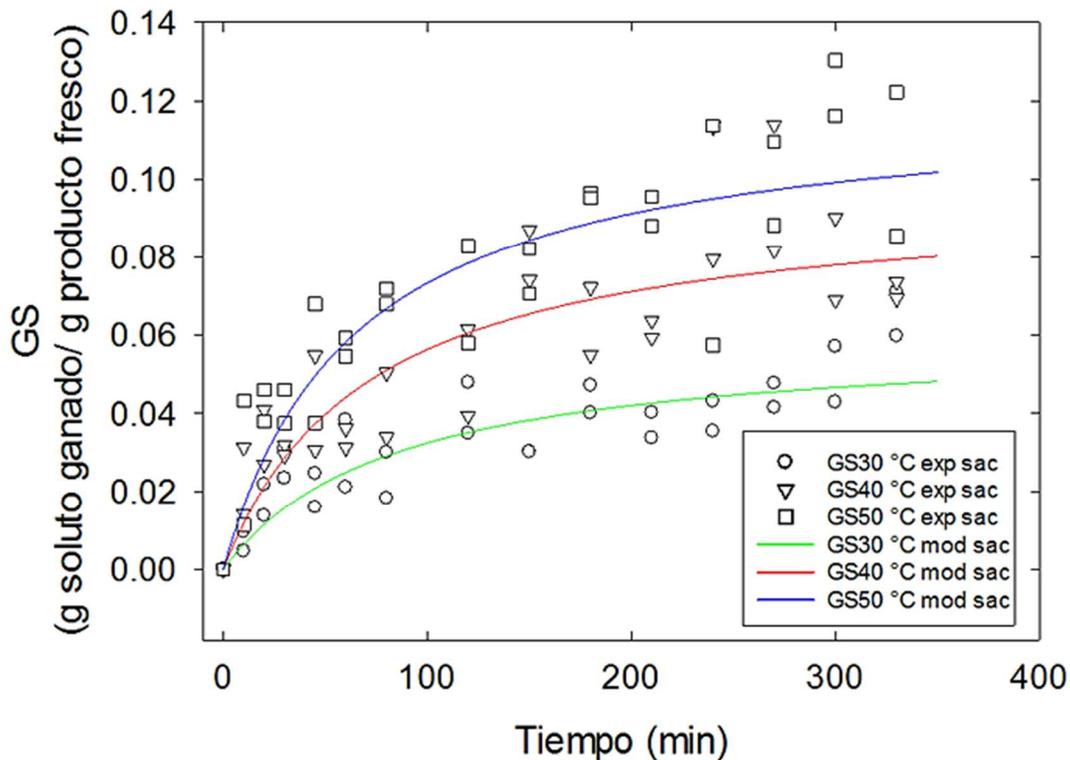


Figura 23. Cinética experimental y modelada de la ganancia de sólidos en el proceso de deshidratación osmótica de gajos de manzana con solución de sacarosa.

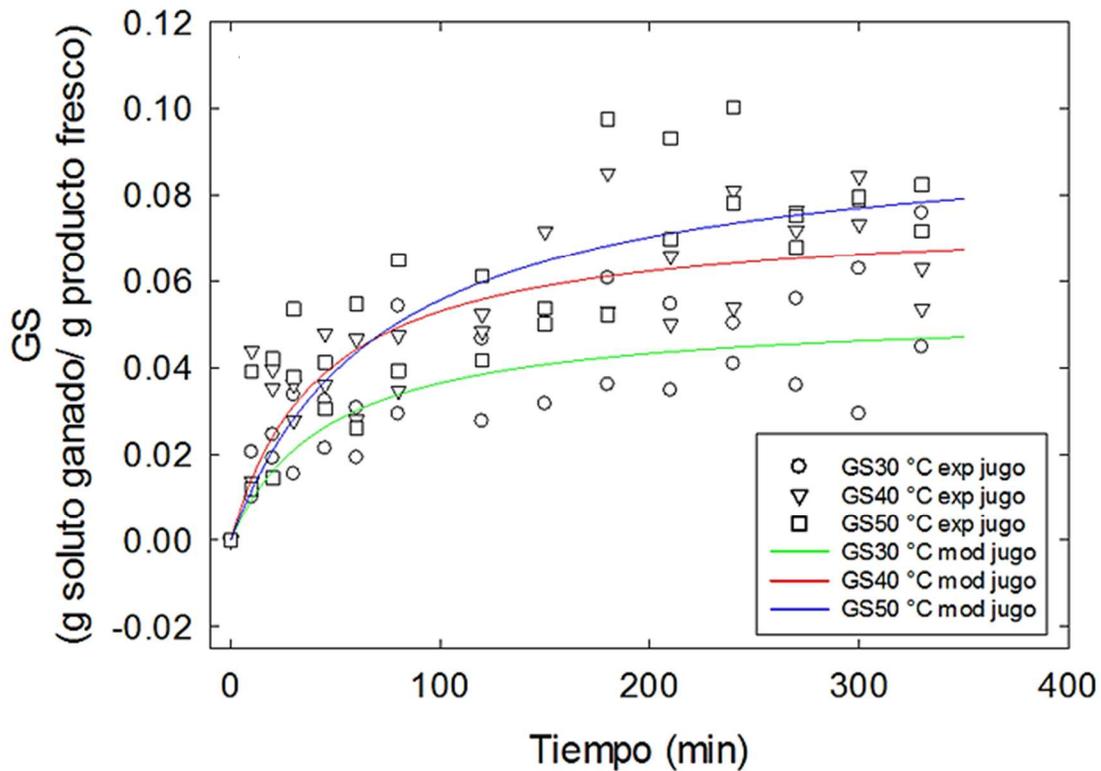


Figura 24. Cinética experimental y modelada de la ganancia de sólidos en el proceso de deshidratación osmótica de gajos de manzana con jugo de betabel.

### 3.2.3 Parámetros obtenidos con modelo de Azuara para pérdida de agua y ganancia de sólidos

Las cinéticas de transferencia de masa se modelaron de acuerdo con el modelo de Azuara, y se calcularon los parámetros cinéticos (Tabla 14). Se observó (Figuras 22-24) que los valores de pérdida de agua y ganancia de sólidos obtenidos fueron representados con mayor precisión y ajuste en la representación del proceso de osmódeshidratación, lo cual se puede

### 3.2 Pérdida de agua y ganancia de sólidos en equilibrio

corroborar debido a que los valores de coeficiente de determinación generalizado ( $R^2$ ) son cercanos a uno (Kaur & Singh, 2013).

Tabla 14. Parámetros obtenidos de datos experimentales de osmodeshidratación para tres temperaturas

Temperatura (°C)	Nomenclatura	$Y_{\infty}$	k	$R^2$
30	PA_OD sac	0.4703	0.0151	0.9344
40	PA_OD sac	0.3897	0.0220	0.9614
50	PA_OD sac	0.7242	0.0130	0.9443
30	PA_OD jugo	0.5367	0.0123	0.9350
40	PA_OD jugo	0.5711	0.0094	0.8863
50	PA_OD jugo	0.5895	0.0159	0.8714
30	GS_ODsac	0.0966	0.0140	0.8085
40	GS_ODsac	0.0597	0.0119	0.8061
50	GS_ODsac	0.1204	0.0156	0.7993
30	GS_ODjugo	0.0756	0.0234	0.8728
40	GS_ODjugo	0.0532	0.0217	0.7333
50	GS_ODjugo	0.0953	0.0140	0.8350

PA= pérdida de agua  
 GS=ganancia de soluto  
 OD= deshidratación osmótica (osmotic dehydration)

Otros autores han reportado este modelo debido a que es capaz de predecir la transferencia de masa durante el proceso de deshidratación osmótica en diferentes frutas debido a su versatilidad en el cálculo de los valores en equilibrio de la pérdida de agua y ganancia de sólidos (Della Rocca & Mascheroni, 2010; Kaur & Singh, 2013; Arias, Perea, & Zapata, 2017).

### 3.3 Modelación de cinéticas de impregnación de compuesto fenólicos, capacidad antioxidante y betalaínas totales (betacianinas y betaxantinas)

---

### 3.3 Modelación de cinéticas de impregnación de compuesto fenólicos, capacidad antioxidante y betalaínas total (betacianinas y betaxantinas)

En las Figuras 25 y 26 se muestran las cinéticas experimentales y modeladas de compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante ganados durante el proceso de deshidratación osmótica de gajos de manzana en jugo de betabel ajustado a 50 °Brix. En ella se puede observar de forma análoga a la ganancia de sólidos la incorporación de los compuestos fenólicos y capacidad antioxidante.

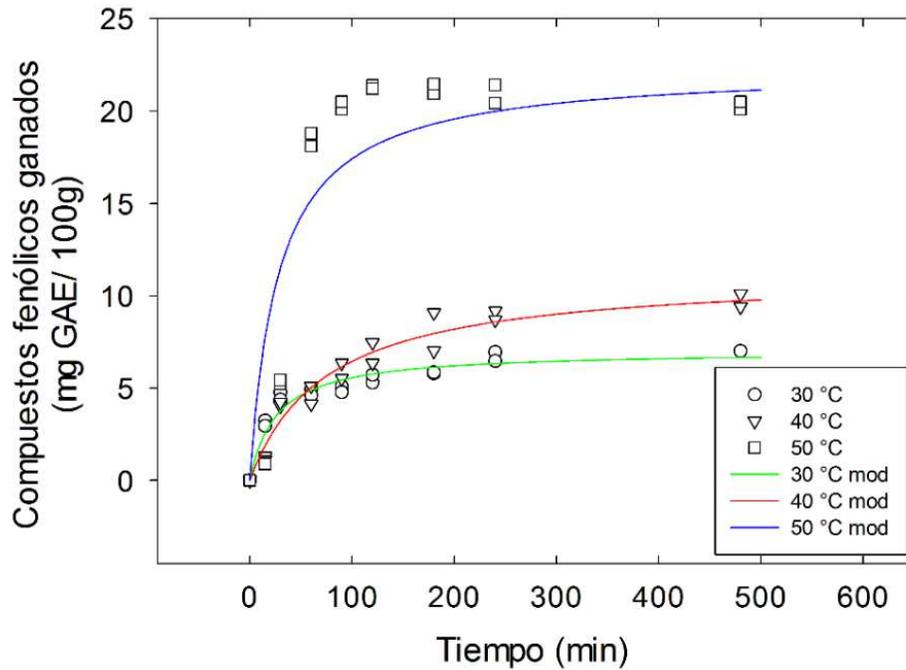


Figura 25. Cinéticas experimentales y modeladas de impregnación de compuestos fenólicos totales en el proceso de deshidratación osmótica con jugo de betabel de gajos de manzana

### 3.3 Modelación de cinéticas de impregnación de compuesto fenólicos, capacidad antioxidante y betalainas totales (betacianinas y betaxantinas)

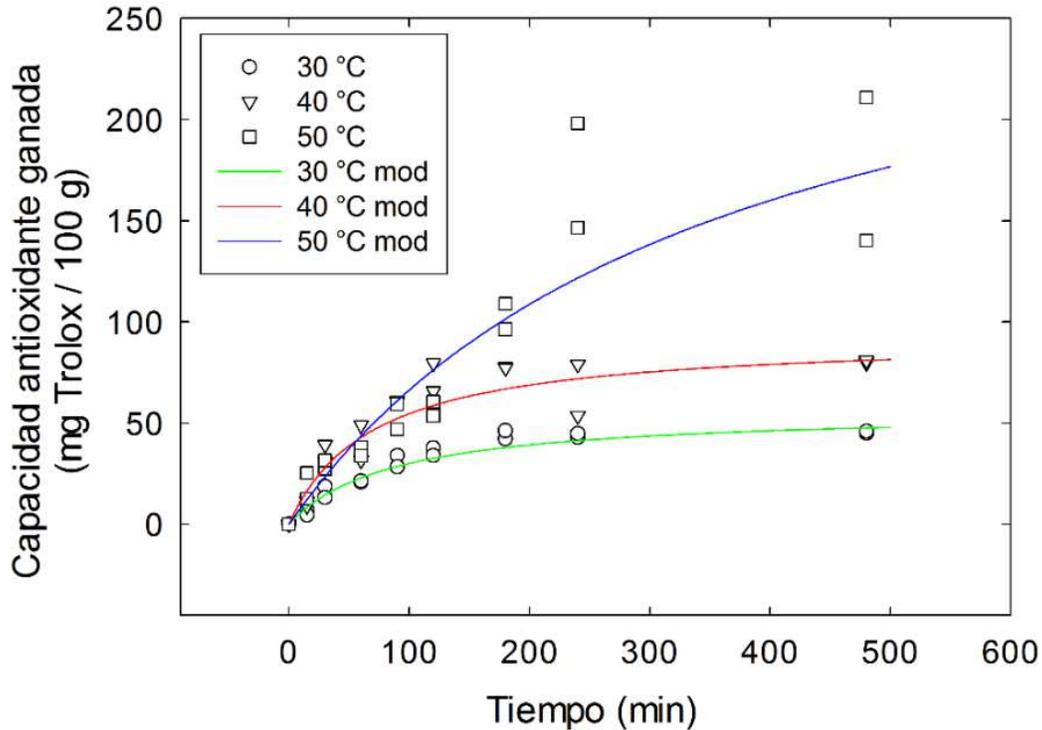


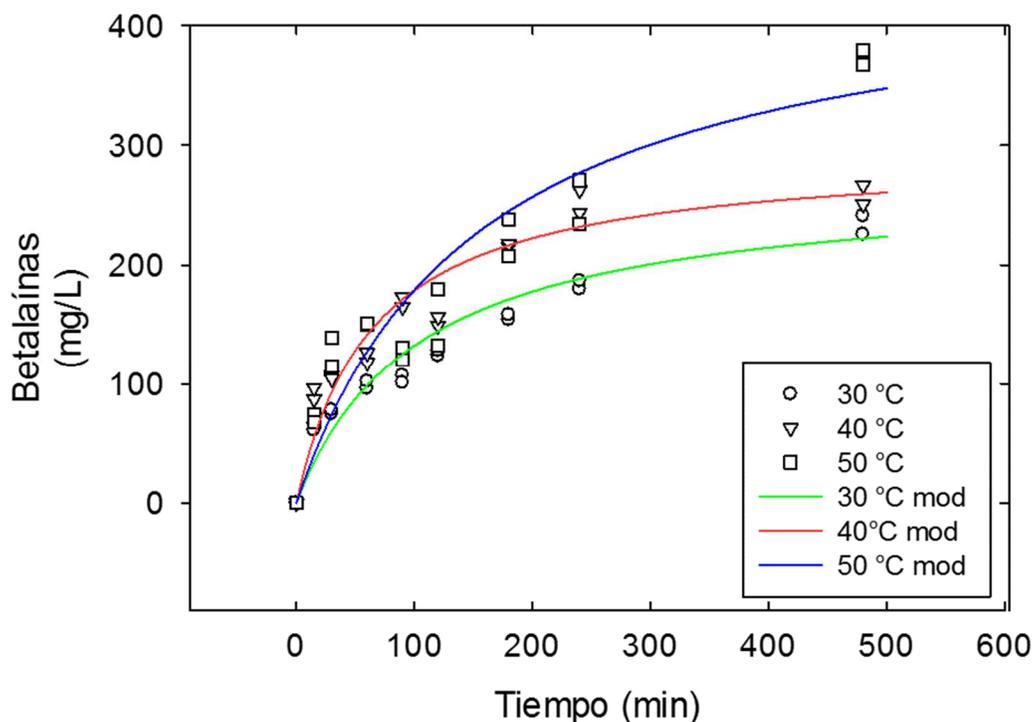
Figura 26. Cinéticas experimentales y modeladas de ganancia de capacidad antioxidante en el proceso de deshidratación osmótica con jugo de betabel de gajos de manzana

Con respecto a la ganancia de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante, a partir de los 200 min se alcanzó el equilibrio. Se observó que a medida que la temperatura es mayor, la viscosidad de la solución disminuye por lo que se ve favorecida la difusividad de la solución dentro de la rebanada de manzana y por lo tanto de los compuestos fenólicos (Jiménez-Hernández *et al.*, 2017). Asimismo, es importante mencionar que el cambio que existe en la permeabilidad de la membrana celular durante el proceso de osmodeshidratación es atribuida al aumento de la temperatura, lo cual favorece la ganancia de compuestos fenólicos en la matriz alimenticia (Dagde & Jacob Nmegbu, 2014 ; Jiménez-Hernández *et al.*, 2017).

### 3.3 Modelación de cinéticas de impregnación de compuesto fenólicos, capacidad antioxidante y betalaínas totales (betacianinas y betaxantinas)

Por otra parte, se observa que a medida que los compuestos fenólicos aumentan, la capacidad antioxidante también aumenta, lo cual concuerda con reportes en donde se hace mención de la relación que existe entre los compuestos fenólicos totales y la capacidad antioxidante, puesto que a medida que aumenta uno el otro también lo hace (Amzad Hossain & Dawood Shah, 2015; Piluzza & Bullitta, 2011).

En cuanto a la ganancia de betalaínas totales (betacianinas y betaxantinas) (Figuras 26 y 27) el equilibrio fue alcanzado después de los 200 min. Es importante mencionar que existe un comportamiento análogo (compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante) entre el contenido de betalaínas y la capacidad antioxidante, ya que a medida que la concentración de betalaínas aumenta la capacidad antioxidante se ve incrementada (García-Cruz, Salinas-Moreno, & Valle-Guadarrama, 2012).



### 3.3 Modelación de cinéticas de impregnación de compuesto fenólicos, capacidad antioxidante y betalaínas totales (betacianinas y betaxantinas)

Figura 27. Cinéticas experimentales y modeladas de impregnación de betalaínas en gajos de manzana a tres temperaturas

En la Figura 28 se muestra el comportamiento de la incorporación de betacianinas y betaxantinas, donde se observa que la concentración de las primeras es mayor que las segundas; esto se atribuye a que las betalaínas están compuestas en un 60 % por betacianinas y un 40 % de betaxantinas (Kujala *et al.*, 2001; Gengatharan *et al.*, 2015). Asimismo, se observa el efecto de la temperatura en la reducción de la viscosidad de la solución osmótica (jugo de betabel) en la incorporación de estos compuestos.

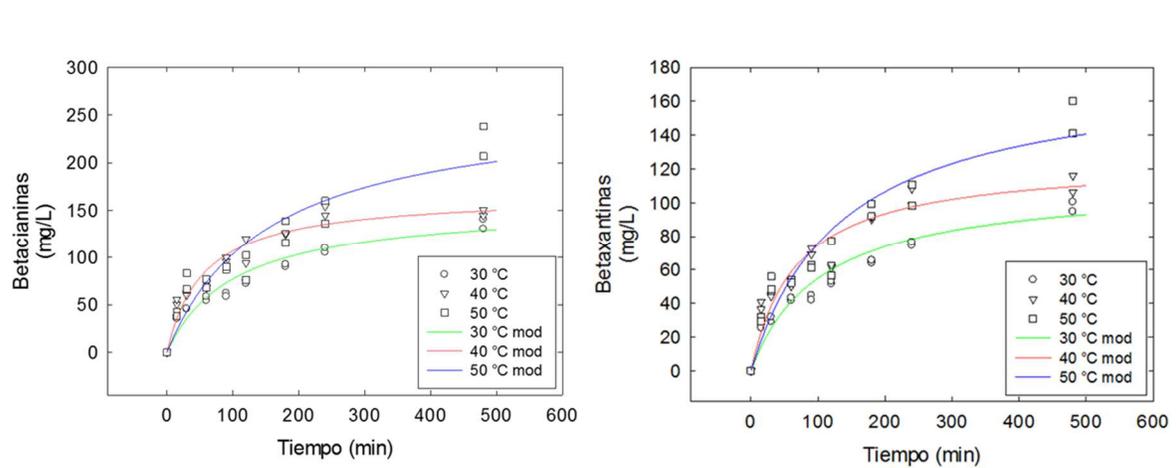


Figura 28. Cinéticas experimentales y modeladas de impregnación de betacianinas y betaxantinas en gajos de manzana a tres temperaturas

Con lo que respecta al ajuste del modelo de Azuara, el cual es un modelo empírico utilizado para reproducir condiciones semejantes a las experimentales, los modelos se ajustaron satisfactoriamente a los datos experimentales obtenidos durante la impregnación de los gajos de manzana con jugo de betabel, obteniendo valores cercanos a 1 de coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Debido a la falta de cinéticas reportadas utilizando jugo de betabel,

### 3.3 Modelación de cinéticas de impregnación de compuesto fenólicos, capacidad antioxidante y betalaínas totales (betacianinas y betaxantinas)

los resultados se compararon con trabajos en los que se emplea el modelo de Azuara (Della Rocca & Mascheroni, 2010; Ganjloo *et al.*, 2011).

#### 3.3.1 Parámetros obtenidos con modelo de Azuara para compuestos fenólicos totales, capacidad antioxidante y betalaínas totales (betacianinas y betaxantinas)

En las Tabla 16 y 17 se muestran los valores de los parámetros  $Y_{\infty}$  y  $k$ . Los valores en equilibrio se obtuvieron como las pendientes recíprocas de  $t = Y_{\infty}$  contra el tiempo para cada condición de secado osmótico y las intersecciones se usaron para calcular el segundo parámetro ( $k$ ). Los valores cercanos a 1 de  $R^2$  entre los valores experimentales y los calculados por el modelo de Azuara indican la aceptabilidad del modelo y de los valores de equilibrio calculados.

Tabla 15. Parámetros obtenidos de datos experimentales de ganancia de compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante durante osmodeshidratación con jugo de betabel para tres temperaturas

Temperatura (°C)	Nomenclatura	$Y_{\infty}$	$Y_{\infty}$	$R^2$
30	CFT	7.0028	0.0385	0.9424
40	CFT	11.2233	0.0138	0.9609
50	CFT	22.3214	0.0355	0.8383
30	CA	56.1798	0.0115	0.9559
40	CA	92.5926	0.0144	0.8885
50	CA	238.0953	0.0034	0.7876

CFT= compuestos fenólicos totales  
CA= capacidad antioxidante

Debido a la falta de reportes que utilicen el modelo de Azuara para determinar el equilibrio en la ganancia de compuestos fenólicos totales, capacidad antioxidante y betalaínas totales, los valores obtenidos se compararon de forma análoga con el comportamiento en la

### 3.3 Modelación de cinéticas de impregnación de compuesto fenólicos, capacidad antioxidante y betalaínas totales (betacianinas y betaxantinas)

determinación de los parámetros en equilibrio para ganancia de sólidos (Moreira & Xidieh, 2004; Ochoa-Martinez *et al.*, 2007; Lucena *et al.*, 2013).

Tabla 16. Parámetros obtenidos de datos experimentales de ganancia de betalaínas totales (betacianinas y betaxantinas) durante osmodeshidratación con jugo de betabel para tres temperaturas

Temperatura (°C)	Nomenclatura	$Y_{\infty}$	k	$R^2$
30	Betalaínas	270.2703	0.0096	0.9498
40	Betalaínas	294.1176	0.0155	0.9717
50	Betalaínas	454.5455	0.0065	0.8240
30	BC	156.2500	0.0098	0.9503
40	BC	166.6667	0.0179	0.9812
50	BC	263.1579	0.0065	0.8259
30	BX	112.3596	0.0096	0.9484
40	BX	125.0000	0.0148	0.9656
50	BX	178.5714	0.0074	0.8786

BC=betacianinas  
BX= betaxantinas

#### 3.3.2 Coeficientes de difusión de compuestos fenólicos totales, capacidad antioxidante y betalaínas totales (betacianinas y betaxantinas)

El gradiente de presión osmótica es la fuerza motriz para la transferencia de masa. En este sentido, diversos autores concuerdan que esta fuerza impulsora depende tanto de la concentración como de la temperatura de la solución osmótica (Rastogi & Raghavarao, 1997). Por lo tanto, un aumento en la temperatura o la concentración da como resultado un aumento en el gradiente de presión osmótica lo cual se refleja en una mayor transferencia de masa y valores más altos de coeficientes de difusión efectivos. Tal y como se observa en la Tabla 15, los valores de coeficientes de difusión obtenidos de los datos experimentales obtenidos (Beristain, Azuara, Cortés, & García, 1990; Kaymak-Ertekin & Sultanoğlu, 2000)

### 3.3 Modelación de cinéticas de impregnación de compuesto fenólicos, capacidad antioxidante y betalaínas totales (betacianinas y betaxantinas)

Tabla 17. Coeficientes de difusión de ganancia de compuestos fenólicos totales ( $D_{CFT}$ ), capacidad antioxidante ( $D_{CA}$ ), betalaínas totales ( $D_{\text{betalaínasT}}$ ), betacianinas ( $D_{BC}$ ) y betaxantinas ( $D_{BX}$ ) durante el proceso de deshidratación osmótica de manzana

Temperatura (°C)	$D_{CFT}$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_{CA}$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_{\text{betalaínasT}}$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_{BC}$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_{BX}$ (m <sup>2</sup> /s)
30	$1.66 \times 10^{-9}$	$2.68 \times 10^{-9}$	$9.57 \times 10^{-10}$	$9.34 \times 10^{-10}$	$9.99 \times 10^{-10}$
40	$2.08 \times 10^{-9}$	$3.55 \times 10^{-9}$	$1.49 \times 10^{-9}$	$1.50 \times 10^{-9}$	$1.53 \times 10^{-9}$
50	$7.51 \times 10^{-9}$	$2.57 \times 10^{-9}$	$1.80 \times 10^{-9}$	$2.19 \times 10^{-9}$	$1.66 \times 10^{-9}$

Uno de los responsables de disminuir los coeficientes de difusión fue el peso de las moléculas de los sólidos solubles como lo son: sacarosa (342.297 g/mol), compuestos fenólicos (612 g/mol) y betalaínas (550.473 g/mol) los cuales se incorporaron a la matriz de forma simultánea. En este sentido, Ferrando *et al.* (2011) observaron que, durante la impregnación de compuestos fenólicos presentes en una infusión de uva, los valores de coeficientes de difusión eran más lentos debido a la presencia de sacarosa.

### 3.4 Caracterización de producto deshidratado con jugo de betabel

En las tablas 18 y 19 se muestran la concentración de compuestos fenólicos totales (CFT) y capacidad antioxidante (CA). En ellas se observa una disminución con respecto a la temperatura utilizada para ambos tratamientos (solución sacarosa y jugo de betabel). Con respecto a las pérdidas de CFT durante la deshidratación pueden deberse a la unión de polifenoles a otros compuestos o a modificaciones de la estructura química que pueden complicar la extracción y la cuantificación por métodos comúnmente utilizados (Miranda *et al.*, 2010; Qu *et al.*, 2010).

### 3.4 Caracterización de producto deshidratado con jugo de betabel

---

Tabla 18. Contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) en producto deshidratado a tres temperaturas después del tratamiento de osmodeshertatación

	<b>OD sacarosa</b>	<b>OD jugo betabel</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>CFT (mg GAE/100g)</b>	<b>CFT (mg GAE/100g)</b>
60	84.30 ± 2.51	127.75 ± 2.91
70	81.89 ± 0.70	124.92 ± 13.53
80	80.39 ± 11.69	98.55 ± 0.037

Con respecto al comportamiento de los valores obtenidos de capacidad antioxidante, los valores más bajos se observaron a 80°C. De igual forma, esto puede ser atribuido al hecho que los compuestos que son más sensibles al calor se degradaron o se transforman a esta temperatura (Katsube *et al.*, 2009; Mireles-Arriaga *et al.*, 2016).

Tabla 19. Contenido de capacidad antioxidante (CA) en producto deshidratado a tres temperaturas después del tratamiento de osmodeshertatación

	<b>OD sacarosa</b>	<b>OD jugo betabel</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Capacidad antioxidante (mg Trolox/100g)</b>	<b>Capacidad antioxidante (mg Trolox/100g)</b>
60	564.63 ± 2.45	448.34 ± 3.34
70	454.66 ± 3.11	399.0 ± 19.77
80	371.36 ± 23.32	279.47 ± 10.51

## 4. Conclusiones

En el presente trabajo se estudió el transporte de masa del proceso de deshidratación osmótica y secado convectivo de compuestos fenólicos, betalaínas y capacidad antioxidante en gajos de manzana con jugo de betabel. Se caracterizaron las materias primas para establecer los valores iniciales de los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante, los valores obtenidos concuerdan los índices de madurez adecuados para llevar a cabo el estudio de transferencia de masa. Se modelaron las cinéticas de pérdida de agua y ganancia de sólidos durante la deshidratación osmótica a tres temperaturas (30, 40 y 50 °C), en donde se obtuvieron buenos ajustes para ambos casos ( $R^2 > 0.80$ ). En cuanto a las cinéticas modeladas de impregnación de compuestos fenólicos, betalaínas y capacidad antioxidante también se obtuvieron buenos ajustes del coeficiente de correlación ( $R^2 > 0.82$ ).

Se calcularon los coeficientes de difusión de agua ( $D_w$ ), solutos ( $D_s$ ), compuestos fenólicos totales ganados ( $D_{cf}$ ), capacidad antioxidante ganada ( $D_{ca}$ ), betalaínas totales ganadas ( $D_{\text{betalaínasT}}$ ), betacianinas ganadas ( $D_{BC}$ ) y betaxantinas ganadas ( $D_{BX}$ ). Se observó que a mayor temperatura la difusión se ve favorecida obteniendo valores más rápidos a que a temperaturas menores. Aunado a esto el tamaño de los sólidos a incorporarse en la rebanada de manzana entorpecían el tránsito tránsito hacia su interior, al mismo tiempo que los poros pueden colapsar después de determinado tiempo del proceso de osmodeshidratación. Finalmente, se observó que los compuestos incorporados durante el proceso de deshidratación osmótica se vieron disminuidos durante la eliminación final de humedad (secado convectivo) a las temperaturas propuestas.

## 5. Bibliografía

- Amzad Hossain, M., & Dawood Shah, M. (2015). A study on the total phenols content and antioxidant activity of essential oil and different solvent extracts of endemic plant *Merremia borneensis*. *Arabian Journal of Chemistry*, 8(1), 66-71.
- AOAC. (1997). *Official methods of analysis (Association of Official Analytical Chemist)*. Arlington, Virginia.
- Arias, L., Perea, Y., & Zapata, J. (2017). Kinetic of the Mass Transfer Process in the Osmotic Dehydration of Mango (*Mangifera indica* L.) var. Tommy Atkins as Function of the Temperature. *Información tecnológica*, 28(3), 47-58.
- Azeredo, H. (2009). Betalains: properties, sources, applications, and stability a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(12), 2365-2376.
- Badui-Dergal, S. (1999). *Química de los alimentos*. México: Pearson.
- Bazaria, B., & Kumar, P. (2016). Compositional Changes in Functional Attributes of Vacuum Concentrated Beetroot Juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(6), 1215-1222.
- Beristain, C., Azuara, E., Cortés, R., & García, H. (1990). Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings. *International Journal of Food Science & Technology*, 25(5), 576-582.
- Casierra-Posada, F., & Aguilar-Avendaño, Ó. E. (2008). Calidad en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Agronomía Colombiana*, 26(2), 300-307.
- Casseres, E. (1980). *Producción de hortalizas*. Biblioteca Ortin IICA/CATIE. .

## 5. Bibliografía

- Cazpski, J., Mikolajczyk, K., & Kaczmarek, M. (2009). Relationship between antioxidant capacity of red beet juice and contents of its betalain pigments. *Journal of Food Nutrition Sciences*, 59(2), 119-122.
- Cortés, M., Chiralt, A., & Puente, L. (2005). Alimentos funcionales: una historia con mucho presente y futuro. *Revista de la facultad de química farmacéutica*, 12(1), 5-14.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press.
- Dagde, K., & Jacob Nmegbu, G. (2014). Mathematical Modeling of a Tray Dryer for the Drying of Potato Chips Using Hot Air Medium. *International Journal of Advancements in Research & Technology*, 3(7), 104-107.
- Davis, U. (2015). UC Davis: Postharvest Technology.
- Della Rocca, P., & Mascheroni, R. (2010). Modelos empíricos en la deshidratación osmótica de papas. *Rumnos tecnológicos*, 2, 57-66.
- Escribano, J., Gandía-Herrero, F., Caballero, N., & Pedreño, M. (2002). Subcellular Localization and Isoenzyme Pattern of Peroxidase and Polyphenol Oxidase in Beet Root (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(21), 6123-6129.
- Ferrando, M., Rózek, A., Achaerandio, I., & Güell, C. (2011). Grape phenolic infusion into solid foods: studies on mass transfer and antioxidant capacity. *Procedia Food Science*, 1, 1494-1501.
- Francini, A., & Sebastiani, L. (2013). Phenolic Compounds in Apple (*Malus x domestica* Borkh.): Compounds Characterization and Stability during Postharvest and after Processing. *Antioxidants*, 2(3), 181-193.

## 5. Bibliografía

- Fu, L., Xu, B., Xu, X., Gan, R., Zhang, Y., & Xia, E. L. (2011). Antioxidant capacities and total phenolic contents of 62 fruits. *Food Chemistry*, *129*(2), 345-350.
- Ganjloo, A., Rahman, R., Bakar, J., Osman, A., & Bimakr, M. (2011). Mathematical modelling of mass transfer during osmotic dehydration. *International Food Research Journal*, *18*(3), 1105-1110.
- García-Cruz, L., Salinas-Moreno, Y., & Valle-Guadarrama, S. (2012). Betalaínas, compuestos fenólicos y actividad antioxidante en pitaya de mayo (*Stenocereus griseus* H.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, *35*(5), 1-5.
- Gengatharan, A., Dykes, G. A., & Choo, W. (2015). Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. *LWT - Food Science and Technology*, *64*(2), 645-649.
- Gimeno-Creus, E. (2004). Compuestos fenólicos totales. Un análisis de sus beneficios para la salud. *Farmacia y Salud, Oficina de Farmacia*, *23*, 80-84.
- Hasler, C. (2002). Functional Foods: Benefits, Concerns and Challenge. A Position Paper from the American Council on Science and Health. *The Journal of Nutrition*, *3772*–*3781*.
- Jiménez, J. (2007). *Metodología para la evaluación de ingredientes funcionales antioxidantes efectos de fibra antioxidante de uva en status antioxidante y parámetros de riesgo cardiovascular en humanos*. Ph.D. thesis: Universidad Autónoma de Madrid.
- Jiménez-Hernández, J., Estrada-Bahena, E., Maldonado-Astudillo, Y., Álvarez-Fitz, P., Ramírez, M., & Salazar, R. (2017). Osmotic dehydration of mango with impregnation of inulin and piquin-peper oleoresin. *LWT - Food Science and Technology*, *79*, 609-615.

## 5. Bibliografía

- Kalinowska, M., Bielawska, A., Lewandowska-Siwkiewicz, H., W., P., & Lewandowski, W. (2014). Apples: Content of phenolic compounds vs. variety, part of apple and cultivation model, extraction of phenolic compounds, biological properties. *Plant Physiology and Biochemistry*, 84, 169-188.
- Katsube, T., Tsurunaga, Y., Sugiyama, M., Furuno, T., & Yamasaki, Y. (2009). Effect of air-drying temperature on antioxidant capacity and stability of polyphenolic compounds in mulberry (*Morus alba* L.) leaves. *Food Chemistry*, 113(4), 964-969.
- Kaur, K., & Singh, A. (2013). Mass transfer kinetics and optimization during osmotic dehydration of beetroot (*Beta vulgaris* L.). *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(8), 1-8.
- Kaymak-Ertekin, F., & Sultanoğlu, M. (2000). Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples. *Journal of Food Engineering*, 46(4), 243-250.
- Khoyi, M., & Hesari, J. (2007). Osmotic dehydration kinetics of apricot using sucrose solution. *Journal of Food Engineering*, 78(4), 1355-1360.
- Kujala, T., Loponen, J., & Pihlaja, K. (2001). Betalains and phenolics in red beetroot (*Beta vulgaris*) peel extracts: extraction and characterisation. *Z. Naturforsch*, 56, 343-348.
- Landl, A., Abadias, M., Sárraga, C., Viñas, I., & Picouet, P. (2010). Effect of high pressure processing on the quality of acidified Granny Smith apple purée product. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10(4), 557-564.
- Leyva, D. (2009). *Determinación de antocianinas, fenoles totales y actividad antioxidante en licores y fruto de mora*. M. Phil. Thesis: Universidad Autonoma de Oaxaca.
- Lucena Barbosa, J., Cordeiro Mancini, M., & Dupas Hubinger, M. (2013). Mass transfer kinetics and mathematical modelling of the osmotic dehydration of orange-fleshed

## 5. Bibliografía

- honeydew melon in corn syrup and sucrose solutions. *International Journal of Food Science & Technology*, 2463-2473.
- Marszałek, K., Krzyżanowska, J., Woźniak, L., & Skąpska, S. (2017). Kinetic modelling of polyphenol oxidase, peroxidase, pectin esterase, polygalacturonase, degradation of the main pigments and polyphenols in beetroot juice during high pressure carbon dioxide treatment. *LWT - Food Science and Technology*, 417-417.
- Martirosyan, D., & Singh, J. (2015). A new definition of functional food by FFC: what makes a new definition unique? Review. *Functional Foods in Health and Disease*, 5(6), 209–223.
- Miranda, M., Vega-Gálvez, A., López, J., Parada, G., Sanders, M., Aranda, M., . . . Di Scala, K. (2010). Impact of air-drying temperature on nutritional properties, total phenolic content and antioxidant capacity of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Industrial Crops and Products*, 32(3), 259-263.
- Mireles-Arriaga, A., Ruiz-López, I., Hernández-García, P., Espinosa-Ayala, E., López-Martínez, L., & Márquez-Molina, O. (2016). The impact of convective drying on the color, phenolic content and antioxidant capacity of noni (*Morinda citrifolia* L.). *Food Science and Technology*, 36(4), 583-590.
- Molyneux, P. (2004). The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity. *Songklanakarinn Journal Sciencei Technology*, 26(2), 211-219.
- Moreira Azoubel, P., & Xidieh Murr, F. (2004). Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 291-295.

## 5. Bibliografía

- Moreno, M., Betancourt, M., Pitre, A., García, D., Belén, D., & Medina, C. (2007). Evaluación de la estabilidad de bebidas cítricas acondicionadas con dos fuentes naturales de betalaínas: tuna y remolacha. *Bioagro*, 3, 149-159.
- Mundada, M., Singh Hathan, B., & Maske, S. (2011). Mass Transfer Kinetics during Osmotic Dehydration of Pomegranate Arils. *Journal of Food Science*, 76(1), E31-E39.
- Naes, T., Van der Merwe, A., Muller, M., & Steyn, W. (2015). Impact of appearance on degree of links and eating quality expectations of selectes apple cultivars. *International Journal of Food Science and Technology*, 50, 492-499.
- Ochoa-Martinez, C., Ramaswamy, H., & Ayala-Aponte, A. (2007). A Comparison of Some Mathematical Models Used for the Prediction of Mass Transfer Kinetics in Osmotic Dehydration of Fruits. *Drying Technology*, 25(10), 1613-1620.
- Oroian, M., & Escriche, I. (2015). Antioxidants: Characterization, natural sources, extraction and analysis-review. *Food Research International*, 74, 10-36.
- Pacheco-Estay, L. (2009). *Determinación de nutrientes en manzana de las variedades Fuji Royal, Granny Smith y fuji en frutos kibres y afectados por bitter pit*. Chile: Universidad de Chile.
- Paixao, N., Perestrelo, R., Marques, J., & Camara, J. (2007). Relationship between antioxidant capacity and total phenolic content. *Food Chemistry*, 105, 204-214.
- Panadés, G. (1996). Pulse Vacuum Osmotic Dehidratation of Guava. *Food Science And*, 2, 301-306.
- Peleg, M. (1998). An empirical model of description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53, 1216-1219.

## 5. Bibliografía

- Piluzza, G., & Bullitta, S. (2011). Correlations between phenolic content and antioxidant properties in twenty-four plant species of traditional ethnoveterinary use in the Mediterranean area. *Pharmaceutical Biology*, 49(3), 240-247.
- Pinzón, I. d., Fischer, G., & Corredor, G. (2007). Determinación de los estados de madurez del fruto de la gulupa (*Passiflora edulis* Sims). *Agronomía Colombiana*, 25(1), 83-95.
- Pirlak, L., Ünüvar, G., & Ersoy, N. (2017). Determination of antioxidant activities of some apple. *Horticultural Science*, 44(3), 120-125.
- Porras-Loaiza, A., & López-Malo, A. (2009). Importancia de los grupos fenólicos en los alimentos. *Temas selectos de ingeniería de alimentos*, 3, 121-134.
- Qu, W., Pan, Z., & Ma, H. (2010). Extraction modeling and activities of antioxidants from pomegranate marc. *Journal of Food Engineering*, 99(1), 16-23.
- Rahman, M. (2003). *Handbook of Food Preservation*. Estados Unidos: Marcel Dekker.
- Raoult-Wack, A., Guilbert, S., Maguer, M., & Ríos, G. (1991). Simultaneous water and solute transport in shrinking media. Part 1. Application to dewatering and impregnation soaking process analysis. *Drying Technology*, 9, 589-612.
- Rastogi, N., & Raghavarao, K. (1997). Water and solute diffusion coefficients of carrot as a function of temperature and concentration during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 34(4), 429-440.
- Russián, T., Zárraga, Á., & Ruiz, C. (2009). Calidad del fruto de veinticuatro accesiones de Naranja 'Criolla' en Macanillas-Curimagua,. *Revista UDO Agrícola*, 9(1), 15-20.
- SAGARPA. (2015). *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación*.

## 5. Bibliografía

- Sant'Anna, V., Deyse Gurak, P., Ferreira Marczak, L., & Tessaro, I. (2013). Tracking bioactive compounds with colour changes in food. A review. *Dyes and Pigments*, 98, 601-608.
- Sharman, M. (2003). *Ingeniería de alimentos operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*. México: Limusa-Wiley.
- SIAP. (15 de mayo de 2017). *gob.mx*. Obtenido de <https://www.gob.mx/siap/articulos/manzana-mexico-produjo-716-930-toneladas-en-2016?idiom=es>
- Silva, K., Fernandes, M., & Mauro, M. (2014). Effect of calcium on the osmotic dehydration kinetics and quality of pineapple. *Journal of Food Engineering*, 134, 37-44.
- Stintzing, F. C., & Carle, R. (2007). Betalains emerging prospects for food scientists. *Trends in Food Science & Technology*, 18(10), 514-525.
- Thakur, V., & Das Gupta, D. (2006). Studies on the clarification and concentration of beetroot juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 30, 194-207.
- Uddin, M., Ainsworth, P., & Ibanoglu, S. (2004). Evaluation of mass exchange during osmotic dehydration of carrots using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 65, 473-177.
- Vally, H., & Thomson, P. (2001). Role of sulfite additives in wine induced asthma: single dose and cumulative dose studies. *Thorax*, 56(10), 763-769.
- Vasconcellos, J., Conte-Junior, C., Pierucci, D., Paschoalin, V., & Silveira Alvares, T. (2016). Comparison of total antioxidant potential, and total phenolic, nitrate, sugar, and organic acid contents in beetroot juice, chips, powder, and cooked beetroot. *Food Science and Biotechnology*, 25(1), 79-84.

## 5. Bibliografía

Whitaker, J., & Lee, C. (1995). Recent advances in chemistry of enzymatic browning. 2-7.

Wruss, J., Waldenberger, G., Huemer, S., Uygun, P., Lanzerstorfer, P., Müller, U., . . .

Weghber, J. (2015). Compositional characteristics of commercial beetroot products and beetroot juice prepared from seven beetroot varieties grown in Upper Austria.

*Journal of Food Composition and Analysis*, 42, 46-55.

## Anexo

### Preparación de soluciones

#### a) Compuestos Fenólicos Totales

- Etanol acuoso al 90 % (v/v): se mezclaron 90 mL de Etanol con 10 mL de agua destilada.
- Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> al 0.5 % (p/v): se pesaron 50 mg de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> después se disolvió con agua y se aforó a 50 mL.
- Reactivo de Folin- Ciocalteu 0.1M: se midieron 5 mL de reactivo Folin- Ciocalteu 2M enseguida se disolvieron con agua, en ausencia de luz y se aforó a 10 mL.
- Ácido gálico 100 ppm: se pesaron 1 mg de ácido gálico, se disolvió en etanol al 90% hasta un volumen de 10 mL. Los estándares de ácido gálico fueron de 5, 10, 15, 20 y 25 ppm. Se prepararon a partir de la dilución de ácido gálico de 100 ppm.

#### b) Capacidad antioxidante

- Solución de DPPH: para cada ensayo se preparó en un matraz completamente cubierto en papel aluminio la solución del radical libre 1,1-difenil-2-picril-hidrazilo (DPPH•). Se pesaron 0.004 g del radical y se aforó con etanol a 100 mL. El volumen a preparar dependía de la cantidad de muestras a evaluar y subsiguientemente se transfirió a un frasco ámbar cubierto con papel aluminio para evitar su rápida degradación.

#### c) Betalaínas

Buffer Mcilvaine pH 6.5: se realizaron dos soluciones, una solución de Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0.2M y otra de ácido cítrico 0.1M. Se agregó solución de ácido cítrico mililitro por mililitro a la solución de Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> hasta que el pH marcara 6.5