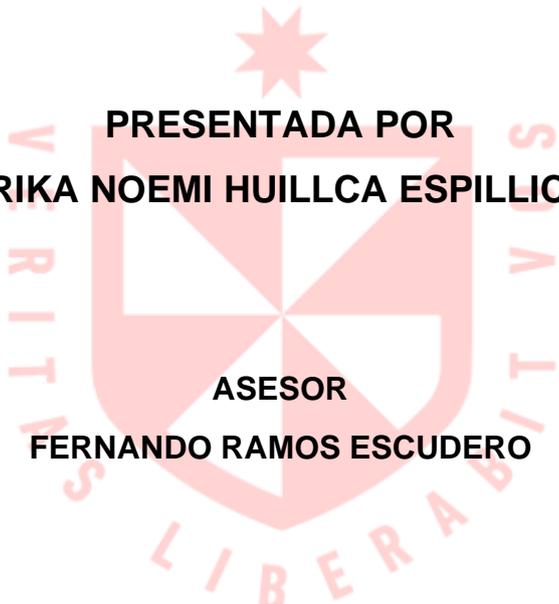


FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

**MICROENCAPSULACIÓN DEL EXTRACTO RESIDUAL
DE LA TORTA GENERADA EN EL PROCESO DE
ELABORACIÓN DE JUGO DE ZANAHORIA**



PRESENTADA POR
ERIKA NOEMI HUILLCA ESPILLICO

ASESOR
FERNANDO RAMOS ESCUDERO

TESIS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA EN INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS

LIMA – PERÚ

2023



CC BY-NC-SA

Reconocimiento – No comercial – Compartir igual

El autor permite transformar (traducir, adaptar o compilar) a partir de esta obra con fines no comerciales, siempre y cuando se reconozca la autoría y las nuevas creaciones estén bajo una licencia con los mismos términos.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



USMP
UNIVERSIDAD DE
SAN MARTÍN DE PORRES

**FACULTAD DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

**MICROENCAPSULACIÓN DEL EXTRACTO RESIDUAL DE LA
TORTA GENERADA EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE
JUGO DE ZANAHORIA**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA EN INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS**

PRESENTADA POR

ERIKA NOEMI HUILLCA ESPILLICO

ASESOR

Dr. FERNANDO RAMOS ESCUDERO

LIMA, PERÚ

2023

Dedico esta investigación a Dios, por darme la fuerza y la inspiración para terminar con éxito una etapa más en mi formación profesional.

A mi Padre, Benedicto Huilca Huamán, que no está conmigo físicamente, pero que ahora es un ángel que guía mi camino, gracias por todas tus enseñanzas Papá, y por ser hoy luz en mi vida.

A mi Madre, Julia Espillico, gracias por tu amor y comprensión, pues sin escatimar esfuerzo alguno has sacrificado gran parte de tu vida para educarme y guiarme en el camino del bien.

A mi hermano Hernán, tu apoyo incondicional fue fundamental para que pueda lograr mis metas.

A Mis hermanas Gabriela y Patricia, quienes siempre han deseado lo mejor para mi vida.

Gracias a todos los que me han alentado y han creído en mí para realizar esta tesis.

Agradezco a mis maestros, quienes, con sus valiosas enseñanzas, profesionalismo y calidad humana, han aportado valores y conocimientos en mi formación profesional y en la realización de esta investigación.

A mi asesor Dr. Fernando Ramos Escudero, por su apoyo incondicional y oportunas recomendaciones para la elaboración de esta tesis.

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de la microencapsulación mediante la técnica de la liofilización del extracto residual de la torta de zanahoria generada en el proceso de jugo, respecto a sus componentes bioactivos. La materia prima utilizada fue la zanahoria (*Daucus carota* L.) de la variedad Royal Chantenay adquirida durante el proceso de prensado en la elaboración de jugo de zanahoria de la empresa Food Pack S.A.C. De las evaluaciones realizadas se determinó que los gránulos liofilizados del extracto residual de la torta de zanahoria presentan diferentes formas amorfas, longitudinales y esféricas que variaron entre 4.071 a 37.66 μm . Asimismo, se determinó que el polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria contiene 6.32 ± 0.05 mg/100 g de carotenoides; 98.61 ± 2.55 mg GAE/100g de polifenoles y 2.33 ± 0.16 mmol TE/100 g de actividad antioxidante. Además los parámetros cromáticos CIELAB de un yogurt enriquecido con diferentes concentraciones del polvo liofilizado de zanahoria (0.00 g, 0.25 g, 0.50 g, 1.00 g y 2.00 g) presentaron diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$), siendo la mejor concentración el de 2.00 g con un parámetro cromático C^*_{ab} de 39.39 y 73.35 (L^*) de claridad.

Palabras clave: microencapsulación, liofilización, carotenoides, polifenoles, *Daucus carota* L.

ABSTRACT

The aim of this research was to evaluate the effect of microencapsulation using the freeze-drying technique of the residual extract of carrot cake generated in the juicing process, with respect to its bioactive components. The raw material used was carrot (*Daucus carota* L.) of the Royal Chantenay variety acquired during the pressing process in the production of carrot juice of the Food Pack S.A.C. company. From the evaluations carried out, it was determined that the freeze-dried granules of the residual extract of carrot cake present different amorphous, longitudinal and spherical shapes that varied between 4.071 to 37.66 μm . Also, the freeze-dried carrot cake powder was determined to contain 6.32 ± 0.05 mg/100 g carotenoids; 98.61 ± 2.55 mg GAE/100g polyphenols and 2.33 ± 0.16 mmol TE/100 g antioxidant activity. In addition, the CIELAB chromatic parameters of yogurt enriched with different concentrations of freeze-dried carrot powder (0.00 g, 0.25 g, 0.50 g, 1.00 g and 2.00 g) presented significant differences according to Tukey's test ($p < 0.05$), the best concentration being 2.00 g with a chromatic parameter C^*_{ab} of 39.39 and 73.35 (L^*) of clarity.

Key words: microencapsulation, freeze-drying, carotenoids, polyphenols, *Daucus carota* L.

NOMBRE DEL TRABAJO

MICROENCAPSULACIÓN DEL EXTRACTO RESIDUAL DE LA TORTA GENERADA EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE JUGOS

AUTOR

ERIKA NOEMI HUILLCA ESPILLICO

RECUENTO DE PALABRAS

13154 Words

RECUENTO DE CARACTERES

74941 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

76 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

3.7MB

FECHA DE ENTREGA

Mar 15, 2023 3:11 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Mar 15, 2023 3:13 PM GMT-5

● 6% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 5% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)
- Material citado



Biblioteca FIA

Juana Chunga Rodríguez
Bibliotecóloga

INTRODUCCIÓN

La tecnología de secado ha pasado de ser una tecnología utilizada principalmente en la conservación de alimentos con el objetivo de prolongar su vida útil a ser una tecnología utilizada en el desarrollo de productos, satisfaciendo las demandas de conveniencia y calidad. Los carotenoides se utilizan como colorantes naturales en la industria alimentaria. Como pigmentos naturales inestables, necesitan protección. Esta protección puede implicar el proceso de microencapsulación. Existen numerosas técnicas que pueden utilizarse para la protección de los carotenoides, una de ellas es la liofilización ([Janiszewska-Turak, 2017](#)). El proceso de liofilización al vacío es una tecnología bien conocida y establecida, y se ha hecho mucho en cuanto a investigación y desarrollo. La liofilización al vacío tiene la ventaja de que se obtienen productos deshidratados de gran valor, con características nutricionales bien conservadas. Los alimentos liofilizados al vacío tienen valores altos de porosidad y baja densidad aparente conservando el color, gusto y el sabor ([Claussen, et al, 2007](#)).

Actualmente existen empresas que han desarrollado productos a base de zanahoria, generando una pérdida significativa de desechos agroindustriales conocidas como “mermas”. Durante el procesamiento de la zanahoria se producen residuos en forma de cáscaras y bagazo, lo que puede crear graves problemas ambientales y económicos. Estos residuos contienen altas cantidades de componentes bioactivos; los cuales podrían utilizarse de manera rentable para la fortificación y el desarrollo de alimentos funcionales, productos farmacéuticos y medicamentos ([Šeregelj et al, 2020](#)). La conversión de los residuos de zanahoria es importante para la industria procesadora de zanahorias, porque estos residuos

tienen un alto contenido de fibra dietética y compuestos bioactivos ([Amin et al, 2021](#)).

Bioquímicamente, la zanahoria es una rica fuente de β -caroteno, fibra y muchos micronutrientes esenciales y componentes funcionales. La presencia de altas concentraciones de carotenoides, en particular de β -caroteno en las raíces de la zanahoria, las convierte en anticancerígenas, eliminadoras de radicales libres, antimutagénicas e inmunoestimulantes ([Sharma, et al, 2011](#)). La zanahoria (*Daucus carota* L.) se considera una importante fuente dietética de carotenoides, en particular de carotenos, que sirven de precursores de la vitamina A. El color de las zanahorias, en general, es un buen indicador de los tipos de carotenoides presentes y de su cantidad ([Arscott y Tanumihardjo, 2010](#)). Los principales carotenoides de la dieta (se hallan en productos de consumo frecuente como los tomates, las zanahorias, los cítricos y sus derivados), que están presentes en el plasma, la leche humana, la piel y otros tejidos, y que están inmersos en varias acciones beneficiosas de la salud ([Meléndez, et al, 2019](#)).

La zanahoria (*Daucus carota* L.) es una planta de raíz esencial, con un alto contenido en sustancias bioactivas como los carotenoides y la fibra dietética, con niveles apreciables de varios otros componentes funcionales con importantes propiedades promotoras de la salud ([Sharma, et al, 2011](#)). Los carotenoides sirven como fuente de precursores de la vitamina A, y la mayoría como pigmentos (luteína, b-criptoxantina, a-caroteno, b-caroteno, zeaxantina y licopeno), los cuales son muy importantes en los alimentos porque ellos y/o sus derivados pueden contribuir a acciones biológicas promotoras de la salud que podrían dar lugar a una disminución del riesgo de ciertas enfermedades. Por lo tanto, son muy relevantes para el

desarrollo de productos que incluyen alimentos funcionales, nutraceuticos, nutricosméticos, suplementos o nuevos alimentos, entre otros ([Mapelli y Meléndez, 2021](#)).

El presente trabajo de investigación consta de la siguiente estructura: En el primer capítulo se encuentra el planteamiento del problema, donde se describe la situación problemática, así como la formulación del problema, y los objetivos de la investigación, al igual que la importancia y la viabilidad de la investigación. En el segundo capítulo se presentan los antecedentes de la investigación, las bases teóricas y la definición de términos básicos. En el tercer capítulo se expone la metodología, donde se describe el lugar de ejecución, la materia prima, los materiales y métodos, el proceso y los métodos de análisis. En el cuarto capítulo se presentan los resultados y en el quinto capítulo se expone la discusión de la investigación, conclusiones, recomendaciones, fuentes de información y finalmente los anexos.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
INTRODUCCIÓN.....	vi
INDICE GENERAL.....	ix
INDICE DE GRÁFICOS.....	ix
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Situación problemática.....	1
1.2 Formulación del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general:.....	3
1.3.2 Objetivos específicos:.....	3
1.4 Importancia de la investigación.....	3
1.5 Viabilidad de la investigación.....	4
1.5.1 Viabilidad técnica.....	4
1.5.2 Viabilidad económica.....	4
1.5.3 Viabilidad social.....	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Antecedentes de la investigación.....	5
2.2 Bases teóricas.....	8
2.2.1 Zanahoria (<i>Daucus carota</i> L.).....	8
2.2.2 Desechos de zanahoria y su potencialidad de uso.....	10
2.2.3 Composición química.....	11
2.2.4 Propiedades terapéuticas.....	14
2.2.5 Pigmentos vegetales.....	15
2.2.6 Carotenoides.....	16
2.2.7 Polifenoles.....	18
2.2.8 Antioxidante.....	19
2.2.9 Liofilización.....	20
2.3 Definición de términos básicos.....	23
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	24
3.1 Lugar de ejecución.....	24
3.2 Materia prima.....	24
3.3 Materiales y equipos.....	25

3.4	Diagrama del proceso	26
3.4.1	Desarrollo del proceso	26
3.5	Métodos	27
3.5.1	Microencapsulación extracto etanolico	27
3.5.2	Microscopía electrónica de barrido (SEM)	28
3.5.3	Medida del color por el sistema CIE L*a*b	28
3.5.4	Determinación de pigmentos vegetales	29
3.5.5	Determinación de compuestos fenólicos	30
3.5.6	Determinación antioxidante	30
3.5.7	Percepción cromática de las partículas liofilizadas del extracto residual de zanahoria en una matriz láctea	31
3.6	Análisis estadístico	32
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		32
CONCLUSIONES		47
RECOMENDACIONES		48
ANEXOS.....		49
FUENTES DE INFORMACIÓN		52

INDICE DE GRÁFICOS

TABLAS	Pág.
Tabla 1. Composición nutricional y química de la zanahoria (<i>Daucus carota</i> L.) expresado en 100 g de pulpa cruda	12
Tabla 2. Composición de minerales de la zanahoria (<i>Daucus carota</i> L.) expresado en 100 g/pulpa cruda	13
Tabla 3. Composición química de la zanahoria (<i>Daucus carota</i> L.) expresado en mg/100 g de peso fresco.	13
Tabla 4. Composición de minerales de la zanahoria (<i>Daucus carota</i> L.) expresado en mg/100 g de peso fresco.....	14
Tabla 5. Propiedades cromáticas, carotenoides totales, polifenoles y actividad antioxidante del polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria.....	36
Tabla 6. Parámetros cromáticos de un yogurt enriquecido con polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria a diferentes cantidades.	43
FIGURAS	
Figura 1. Clasificación de los pigmentos naturales.....	16
Figura 2. Diagrama del proceso.....	26
Figura 3. Polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria empacado al vacío.....	33
Figura 4. Microfotografía del polvo liofilizado de una magnitud de 140 x por 500 μm (A); de una magnitud de 600 x por 100 μm (B); y de una magnitud de 4800 x por 40 μm (C).....	35
Figura 5. Curva de espectro obtenido a partir de un extracto metanólica del polvo (celda de cuarzo de 1 cm de paso óptico).....	39
Figura 6. Porcentaje de inhibición del radical DPPH de diferentes concentraciones del polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria.	40

Figura 7. Representación esquemática de la pérdida de los alimentos y la generación de subproductos.....	42
Figura 8. Representación esquemática del croma (C^*ab) vs claridad (L^*)...	44
Figura 9. Representación esquemática del C^*ab vs b^*	45
Figura 10. Representación esquemática de los parámetros cromáticos a^*b^*	46

CAPÍTULO I.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática

En los últimos años ha aumentado la tendencia a utilizar pigmentos naturales como alternativa a los colorantes sintéticos en las aplicaciones alimentarias, debido tanto a los actos legales como a la preocupación por la salud de los consumidores. Los pigmentos naturales como antocianinas, carotenoides, betalainas, clorofila, entre otros, responden a la creciente solicitud de los clientes de alimentos más sanos y naturales para acabar sustituyendo por completo los colorantes sintéticos. Aparte de su importancia como colorantes naturales, se consideran ingredientes de promoción de la salud que presentan muchas funciones beneficiosas y son una alternativa prometedora a los colorantes sintéticos ([Ghosh et al, 2022](#)).

La zanahoria es una de las materias primas más empleadas en la industria de alimentos, esto se debe a su valor nutricional y a los biocomponentes presentes como la provitamina A y el caroteno. Los carotenoides que se encuentran en las zanahorias naranjas son los α - y β -carotenos, la luteína, el licopeno y la zeaxantina ([Tapiero, et al, 2017](#)). Una de las mejores fuentes de estos pigmentos es la raíz de la zanahoria y la variedad de raíz naranja es la más conocida actualmente; estas contienen predominantemente β -caroteno ([Gonzalvez et al., 2014](#)).

El consumo de zanahorias y sus productos aumenta continuamente debido a su identificación como fuente principal de antioxidantes naturales con acción anticancerígena ([Sharma, et al, 2011](#)). En la actualidad existen empresas que han desarrollado diversos productos a base de zanahoria,

generando una pérdida significativa de desechos agroindustriales también llamadas “mermas”. Para el presente estudio la merma se obtiene específicamente durante el proceso de prensado, donde el residuo generado se le denomina “torta de zanahoria”. Este desecho agroindustrial generado se calcula que es de un 44% en merma, reduciendo los márgenes de ganancia en las empresas.

Estos desechos son fuentes potenciales de pigmentos naturales, como carotenoides, antocianinas, betalaínas y clorofilas. La incorporación de pigmentos naturales en los productos alimentarios mejoraría el aspecto de los mismos, además de proporcionar potenciales efectos positivos para la salud humana. Por lo tanto, la recuperación de los pigmentos naturales de los residuos alimentarios es importante tanto por razones económicas como medioambientales ([Carrillo et al, 2022](#)).

Frente a la problemática antes mencionada es que surge la necesidad de efectuar el presente estudio, el cual consiste en demostrar el efecto significativo de la microencapsulación utilizando la técnica de la liofilización del extracto residual de la torta generada en el proceso de elaboración de jugo de zanahoria. El aprovechar el potencial fitoquímico de estos desechos puede dar lugar a nuevos productos y añadir valor agregado a la industria de los alimentos hortícolas.

1.2 Formulación del problema

¿Cuál es el efecto de la microencapsulación mediante la técnica de la liofilización del extracto residual de zanahoria respecto a sus componentes bioactivos?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general:

Evaluar el efecto de la microencapsulación mediante la técnica de la liofilización del extracto residual de la torta de zanahoria generada en el proceso de jugo, respecto a sus componentes bioactivos.

1.3.2 Objetivos específicos:

- Analizar las partículas liofilizadas mediante microscopía electrónica de barrido.
- Analizar los parámetros cromáticos mediante las coordenadas CIELAB de las partículas liofilizadas.
- Determinar los pigmentos vegetales, compuestos fenólicos, actividad antioxidante y la percepción sensorial de las partículas liofilizadas del extracto residual de zanahoria (*Daucus carota* L.).

1.4 Importancia de la investigación

La zanahoria (*Daucus carota* L.) se encuentra entre los diez cultivos hortícolas más importantes en términos de superficie dedicada a su producción y de tonelaje de producción ([Simon y Goldman, 2007](#)), con una producción mundial anual que excede los 40 millones de toneladas ([Papoutsis y Edelenbos, 2021](#)). Es una hortaliza de raíz que contiene carotenoides, flavonoides, poliacetilenos, vitaminas y minerales, con numerosos beneficios nutricionales y para la salud. Los carotenoides, polifenoles y vitaminas actúan como antioxidantes, anticancerígenos, antibacterianos, antiinflamatorios, potenciadores del sistema inmunitario, además de antidiabética, reductora del

colesterol, hepatoprotectora, cicatrizante y antihipertensiva (Da Silva, 2014). En esta investigación, se utilizó el proceso de liofilización al vacío para preservar el contenido de carotenoides a partir de la torta de zanahoria. Los alimentos liofilizados al vacío tienen una alta porosidad y una baja densidad aparente y conservan el sabor, el color y el gusto (Claussen, et al, 2007). La liofilización es un método práctico para el almacenamiento y el transporte de productos; se usa habitualmente en la industria alimentaria y farmacéutica, incluso se utiliza para conservar muestras biológicas como suero, plasma y tejidos animales (Ye, Wu, Gao, Li, Gu y Zhang, 2019).

1.5 Viabilidad de la investigación

1.5.1 Viabilidad técnica

Se cuenta con la respectiva disponibilidad y accesibilidad a los laboratorios, equipos e instrumentos para el procesamiento y análisis de la muestra, así como también con el apoyo de especialistas en el área de tecnología de análisis fitoquímico y liofilización.

1.5.2 Viabilidad económica

En el aspecto económico es viable, pues la tesista cuenta con el presupuesto adecuado para el financiamiento de los costos directos e indirectos de la investigación. Asimismo, el producto principal que es la zanahoria (merma) se adquirió sin ningún costo pues representa un desecho industrial.

1.5.3 Viabilidad social

La liofilización del extracto residual de la torta generada en el proceso de elaboración del jugo de zanahoria posee excelentes posibilidades

para su consumo e industrialización. La zanahoria (*Daucus carota* L.) es una planta muy consumida en el mundo, contiene vitaminas (A, B, C, D, E y K), carotenoides, minerales y fibra dietética, que le confieren propiedades muy saludables (Encalada et al., 2019). Las zanahorias se consumen crudas o cocidas y se transforman en productos de valor añadido, como zanahorias enlatadas, caramelos, polvo, zumo, bebidas, conservas y productos de humedad intermedia. La utilización comercial de las zanahorias es necesaria en los países en desarrollo y puede servir como una posible alternativa de producción de alimentos funcionales con una serie de ventajas para la salud humana (Raees y Prasad, 2015).

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Rifqi et al (2019) en la investigación titulada “Contenido total de β -caroteno de zanahoria (*Daucus carota* L.) mediante encapsulación” cuyo objetivo fue: demostrar la mejor concentración de β -caroteno con maltodextrina para lo cual se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) con tres tratamientos y tres repeticiones (adición de 3%, 10% y 30%). La muestra consistió en zanahorias de la variedad Chantenay con un tamaño de 15-18 cm y una edad de 3 meses a partir de la propagación de las semillas con un peso de unos 200- 600 gramos. Los resultados mostraron que el polvo de zanahoria β -caroteno con la adición de 20% de maltodextrina produjo el mayor β -caroteno total, que fue de 29.160 ppm.

2.1.2 Macura, Michalczk, Fiutak y Maciejaszek (2019) en la investigación titulada “Efecto de la liofilización y el secado al aire sobre el contenido de carotenoides y antocianinas de zanahorias moradas en conserva”, demostraron que los compuestos fenólicos hallados en mayor cantidad en la zanahoria fueron el ácido ferúlico cianidina 3-xilosilglucosilgalactósido, el ácido p-cumárico cianidina 3-xilosilglucosilgalactósido, el ácido clorogénico y el ácido cafeico-quínico. Asimismo, el proceso de liofilización no redujo significativamente los niveles del contenido de carotenoides y antocianinas, mientras que el secado al aire provocó pérdidas sustanciales de carotenoides, antocianinas y polifenoles. Sin embargo, el almacenamiento durante 6 meses de los productos liofilizados provocó pérdidas de carotenoides, antocianinas y polifenoles totales del 42%, 33% y 53% respectivamente en comparación con la materia prima. En los productos secados al aire, las pérdidas fueron del 66%, 33% y 36%, respectivamente.

2.1.3 Suwannarak y Phanumong (2021) en la investigación titulada: “Elaboración y cuantificación de propiedades fisicoquímicas del tallado de verduras liofilizadas”, demostraron que las hortalizas secas de rosa tallada tenían una baja actividad de agua (0,32-0,42) y contenido de humedad (8,01-11,44%). Las propiedades físicas de la calabaza y la zanahoria talladas liofilizadas eran firmes y consistentes. Sin embargo, el rábano tallado presentaba una ligera contracción, pero se restablecía después de ser sumergirlo en agua. El tiempo de rehidratación fue de 5 minutos para la calabaza y la zanahoria, y de 10 minutos para el rábano chino, lo que demostró que las hortalizas frescas se mantienen firmes. Asimismo, las verduras liofilizadas se

envasaron en bolsas de aluminio con gas de nitrógeno y se mantuvieron a $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 2 meses de almacenamiento. Las características sensoriales evaluadas por los especialistas oscilaron entre medias y muy parecidas a lo largo de los periodos de almacenamiento.

2.1.4 Yildiz (2021) en la investigación titulada “Evaluación del color, microestructura y propiedades fisicoquímicas, texturales y sensoriales con la retención de metabolitos secundarios en rodajas de zanahoria (*Daucus carota* L.) secadas por convección, microondas y congelación”, comprobó que existen diferencias significativas entre las rodajas de zanahoria frescas y secas. Las zanahorias secadas por convección mostraron mejores características de calidad en comparación con las zanahorias secadas por microondas. Las zanahorias secadas por convección a 65°C mostraron la mayor retención de compuestos bioactivos y el mejor color entre todas las condiciones de secado por convección. Las zanahorias secadas por microondas a menor potencia (100 W) mostraron mejores características de calidad en comparación con las zanahorias secadas a 200 W. Las zanahorias liofilizadas mostraron la mayor retención de metabolitos secundarios, propiedades sensoriales y mejor color entre todos los métodos de secado. Por lo tanto, la liofilización es una aplicación prometedora como se muestra en el presente estudio por su capacidad para retener mejor la calidad de la zanahoria subyacente al color, sensorial, textura, microestructura y metabolitos secundarios.

2.1.5 Rajkumar et al (2016) en la investigación titulada “Evaluación comparativa de las propiedades físicas y el perfil aromático de rodajas de zanahoria sometidas a secado por aire caliente y por congelación”, demostraron que el secado por aire caliente impuso mayores efectos sobre los parámetros de textura, las mediciones de color, la proporción de rehidratación y el perfil de aroma de las zanahorias que el secado por liofilización. Los terpenos tuvieron un mayor impacto en la impartición de aroma a las muestras. A partir de los efectos globales, se observa que las muestras de zanahoria mediante el secado por liofilización conservaron el color, el olor y el aspecto característico. Los resultados analíticos confirman que los productos liofilizados tienen una mayor retención del aroma. Por lo tanto, se recomienda la liofilización como la mejor manera de conseguir productos de buena calidad en la deshidratación de zanahorias, aunque con un costo más elevado.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Zanahoria (*Daucus carota* L.)

El género *Daucus* pertenece a la familia Apiaceae (Umbelliferae). Las especies de *Daucus* son plantas herbáceas, rara vez anuales, con raíces pivotantes estrechas a bastante gruesas (Grzebelus et al, 2011). La familia Apiaceae es uno de los grupos de angiospermas más diversos con 300 géneros y entre 2.500 - 3.000 especies. Los miembros de la familia, en su mayoría se encuentran en las regiones templadas del norte y en las tierras altas tropicales de todo el planeta. La umbela es una inflorescencia en forma de paraguas que identifica a esta familia. La zanahoria (*Daucus carota* L.) es

un miembro principal de la familia Apiaceae que fue ampliamente reconocido por razones terapéuticas por los griegos y romanos (Kochhar, 1998 citado por Pant y Manandhar, 2010). La zanahoria (*Daucus carota* L.) es una hierba de floración bienal que alcanza una altura de 20-60 cm. Es originaria de Europa, del norte de África, Asia occidental y Asia tropical (Pakistán) y está ampliamente naturalizada en otras zonas del planeta. La zanahoria se produce comercialmente en casi todo el mundo por sus raíces nutritivas (verdura), que son una fuente principal de carotenoides en la alimentación humana (De Groot y Schmidt, 2016).

Las zanahorias se clasifican en diferentes clases en función de su forma, tamaño y tiempo de maduración. De acuerdo a Hadley y Fordham (2003), son conocidas los siguientes grupos de cultivares:

Chantenay: Son de tamaño medio, cónicas y con raíces en forma de tocón. De maduración tardía. Ampliamente cultivadas para conservas enteras, deshidratación y como producto fresco. Las raíces medianas y grandes pueden ser enlatadas o congeladas en forma de rodajas o en cubos.

Amsterdam forcing: Son de alta calidad, de tamaño pequeño a mediano, delgadas, cilíndricas y con raíces en forma de tocón. Presentan una maduración temprana. Se cultivan para la producción de racimos y el preenvasado a principios de la temporada.

Nantes: Son de tamaño medio, cilíndricos y con raíz en el tocón. Nivel de madurez: medio. Se cultiva sobre todo para el preenvasado, pero también como producto fresco y las conservas.

Berlicum: Son de gran tamaño, cilíndricos y con raíz en el tocón. De maduración tardía. Se cultivan como producto fresco y preenvasado.

Autumn King: Con raíces muy macizas y afiladas de forma cónica. De maduración tardía y alto rendimiento, aunque el color de la pulpa es a menudo inferior debido a la textura áspera de la piel. Se cultiva sobre todo para el mercado como producto fresco, pero también como productos enlatados y congelados en forma de cubos.

2.2.2 Desechos de zanahoria y su potencialidad de uso

Los desechos de frutas y hortalizas, procedentes del consumo humano o de la industrialización, representan la mayor parte de los residuos alimentarios producidos en el mundo. Debido al elevado costo del transporte, la eliminación de estos residuos es una operación costosa, lo que lleva a verterlos y quemarlos en vez de aprovecharlos, lo que puede dar lugar a diversos riesgos medioambientales y sanitarios. Encontrar nuevas fuentes médicas o alimentarias a partir de estos residuos es más útil y valioso que eliminarlos. Podría ser una fuente de productos químicos bioactivos de bajo costo y fácil acceso para su aplicación en la industria farmacéutica o alimentaria ([El-Sawi et al, 2021](#)).

El procesamiento de las zanahorias genera desechos como las cáscaras y los orujos, que pueden causar importantes problemas económicos y medioambientales. Los residuos de zanahoria incluyen una alta concentración de componentes bioactivos, cuya utilidad económica es limitada por el momento. Estos fitoquímicos tienen el potencial de ser utilizados de forma rentable en la fortificación y creación de alimentos funcionales, productos farmacéuticos y medicamentos ([Šeregelj et al, 2020](#)).

Como las zanahorias son perecederas y de temporada, no pueden estar disponibles todo el año. La deshidratación de las zanahorias durante la temporada principal del cultivo es una de las principales opciones de conservación para elaborar productos de valor añadido durante todo el año. El procesamiento industrial de las zanahorias en productos como enlatados, zumos, concentrados, encurtidos, conservas, pasteles y jugos son algunas de las técnicas alimentarias para mantener esta hortaliza crucial disponible todo el año ([Sharma et al, 2011](#)).

2.2.3 Composición química

Los cultivares producidos para el consumo humano contienen alrededor de un 11% de materia seca, de los cuales los azúcares representan el 40-50%. La alta concentración de b-caroteno es responsable del tono naranja. Las zanahorias siempre se han identificado como un remedio para la ceguera nocturna causada por la deficiencia de la vitamina A, pues el b-caroteno es un precursor de la vitamina A ([Hadley y Fordham, 2003](#)). Las zanahorias tienen un alto contenido de caroteno, fibra, micronutrientes vitales y componentes funcionales. Las raíces de las zanahorias tienen cantidades significativas de carotenoides, en particular β -caroteno, que las convierten en anticancerígenas, eliminadoras de radicales libres, antimutagénicas e inmunoestimulantes ([Sharma, et al, 2011](#)).

La zanahoria es una fuente dietética multinutricional. Sus fitoquímicos tienen un alto valor de antioxidantes, que pueden prevenir la degradación celular del cuerpo humano. El ácido ascórbico, los fenoles, los poliacetilenos

y los carotenoides de la raíz de la zanahoria pueden proporcionar una ayuda sin precedentes para combatir estos problemas de salud en todo el mundo. Esta hortaliza se ofrece a los consumidores en casi todas las formas imaginables de alimentos que hay en el mercado, como productos frescos, enlatados, congelados, extraídos, encurtidos, etc. Además, está disponible a bajo costo en todas las zonas templadas del mundo (Yadav, 2020).

En la Tablas 1 y 2 se presentan la composición nutricional y química de las zanahorias crudas.

Tabla 1. Composición nutricional y química de la zanahoria (*Daucus carota* L.) expresado en 100 g de pulpa cruda

Análisis proximal	Valores (100 g/pulpa cruda)	Vitaminas	Valores (100 g/pulpa cruda)
Agua	88.8 g	Caroteno	5330 ug
Azúcar	5.6 g	Tiamina	0.04 mg
Almidón	0.1 g	Riboflavina	0.04 mg
Fibra dietética	2.6 g	Niacina	0.2 mg
Valor energético	30 kcal	Vitamina C	4 mg
Proteínas	0.7 g	Vitamina E	0.56 mg
Grasa	0.5 g	Vitamina B6	0.07 mg
Carbohidratos	6.0 g	Folato	28 ug
Nitrógeno	0.11 g	Ácido pantoténico	0.25 mg
		Biotina	0.6 mg

Nota: [Adaptado de Hadley y Fordham \(2003\)](#)

Tabla 2. Composición de minerales de la zanahoria (*Daucus carota* L.) expresado en 100 g/pulpa cruda

Minerales	Valores (100 g/pulpa cruda)
Sodio	40 mg
Potasio	240 mg
Calcio	34 mg
Magnesio	9 mg
Fósforo	25 mg
Hierro	0.4 mg
Cobre	0.02 mg
Zinc	0.02 mg
Azufre	7 mg

Nota: [Adaptado de Hadley y Fordham \(2003\)](#)

Los valores de la composición química de la zanahoria expresado en mg/100 g de peso fresco se presentan en la Tabla 3:

Tabla 3. Composición química de la zanahoria (*Daucus carota* L.) expresado en mg/100 g de peso fresco.

Análisis proximal	Valores (100 g de peso fresco)	Vitaminas	Valores (mg/100 g peso fresco)
Energía (Cal.)	125	Vitamina A (IU)	1100
Agua (%)	86.0-88.8	Tiamina	0.04
Proteínas (g)	0.7-0.9	Riboflavina	0.02
Grasas (g)	0.2-0.5	Niacina	0.2
Carbohidratos (g)	6.0-10.0	Vitamina C	4
Fibra dietética (g)	1.2-2.4		
Cenizas (g)	1.1		

Nota: [Adaptado de Gupta et al \(2003\)](#)

En la Tabla 4 se presentan los valores de minerales expresado en mg/100 g de peso fresco de las zanahorias:

Tabla 4. Composición de minerales de la zanahoria (*Daucus carota* L.) expresado en mg/100 g de peso fresco.

Minerales	Valores (mg/100 g peso fresco)
Sodio	40
Potasio	240
Calcio	34-80
Magnesio	9.0
Fósforo	25-53
Hierro	0.4-2.2

Nota: [Adaptado de Gupta et al \(2003\)](#)

2.2.4 Propiedades terapéuticas

La zanahoria (*Daucus carota* L.) es una valiosa fuente vegetal de componentes bioactivos con considerables efectos promotores de la salud que van más allá de la simple nutrición. Una mayor ingesta de carotenoides se ha relacionado con una mejora del sistema inmunitario, así como con un menor riesgo de sufrir tumores malignos y enfermedades degenerativas. Además, la presencia de sustancias químicas fenólicas es responsable del aroma y el amargor de las zanahorias, así como de su elevada capacidad antioxidante ([Šeregelj et al, 2020](#)).

La zanahoria es una planta de raíz esencial, con un alto contenido de elementos bioactivos como los carotenoides y las fibras dietéticas, así como en cantidades significativas de otros componentes beneficiosos con características excepcionales para la salud. La zanahoria y sus derivados son cada vez más populares como fuente de antioxidantes naturales con acción anticancerígena ([Surbhi et al, 2018](#)).

2.2.5 Pigmentos vegetales

Los pigmentos vegetales se encuentran entre los compuestos químicos naturales más importantes, que producen varios colores y desempeñan diversas funciones. Estas funciones incluyen la recepción de luz en la fotosíntesis, la protección contra el daño fotooxidativo y la regulación en el desarrollo y la defensa. Las principales clases de pigmentos son las clorofilas (Chl), los carotenoides, los flavonoides y las betalaínas, menos frecuentes. Cada clase tiene una estructura química básica única y consta de subgrupos de derivados que tienen modificaciones sustitutivas de la estructura básica para obtener diferentes colores y funciones biológicas. La mayoría de los pigmentos son nutrientes esenciales y algunos son provitaminas para los seres humanos y los animales. Se reconoce que algunos pigmentos presentan otros beneficios nutracéuticos y para la salud, como la precaución y el tratamiento de algunos trastornos degenerativos ([Solovchenko et al, 2019](#)).

Los pigmentos vegetales se encuentran en abundancia en la naturaleza y se clasifican como tetrapirroles, carotenoides, polifenoles y alcaloides en función de su estructura química. Se emplean en la medicina, la industria alimentaria, la industria textil y otras aplicaciones. Sus aplicaciones biológicas pueden ayudar a prevenir las lesiones oxidativas en la célula causadas por especies reactivas de oxígeno y nitrógeno. Estos pigmentos son fácilmente degradados por la luz, el oxígeno, la temperatura y las condiciones de pH, entre otros ([Aguirre-Joya et al, 2020](#)).

Los pigmentos naturales y sintéticos se clasifican como hidrosolubles y liposolubles, orgánicos o inorgánicos. Además, se clasifican en función de sus afinidades estructurales, su solubilidad y su presencia natural.

La figura 1 muestra la categorización de los pigmentos naturales derivados principalmente de los residuos vegetales (Sharma et al, 2021).

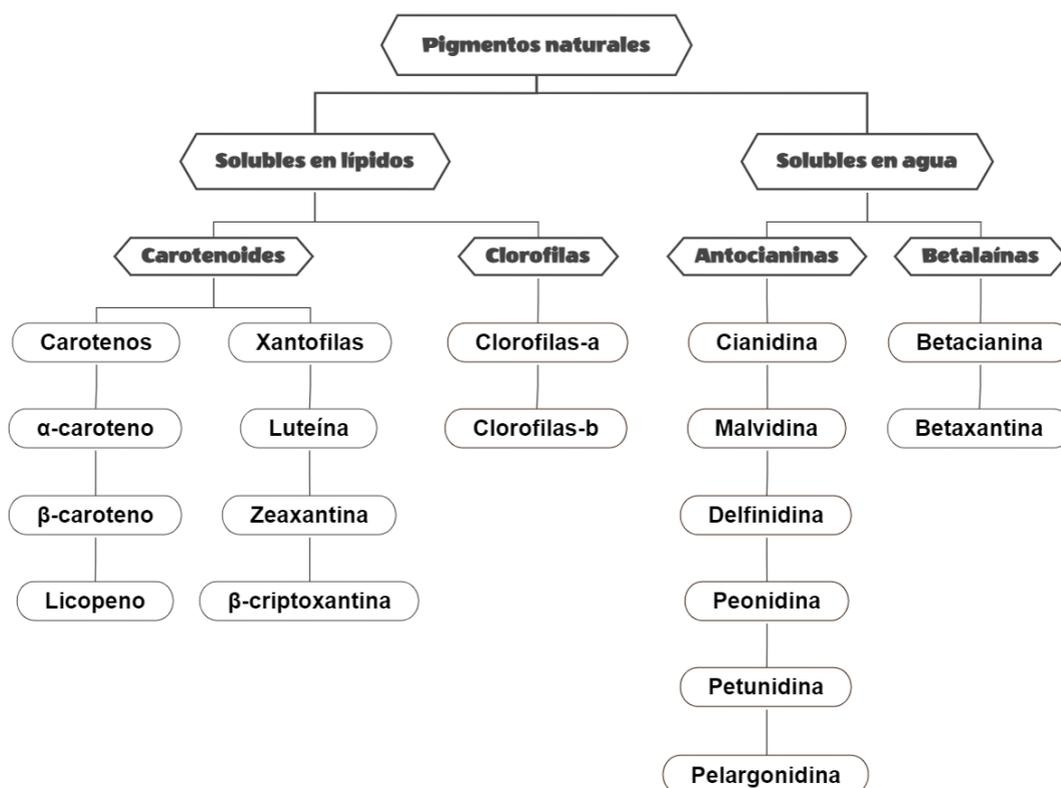


Figura 1. Clasificación de los pigmentos naturales.

2.2.6 Carotenoides

Los carotenoides son pigmentos accesorios presentes en los vegetales y otros fotoautótrofos, que presentan colores entre amarillo, naranja y rojo. Se ha descubierto que las plantas tienen más de 800 carotenoides. Los carotenoides son tetraterpenoides lipofílicos que tienen

una cadena de hidrocarburos de polieno de 40 carbonos (C40) con enlaces dobles y simples alternados entre los carbonos (Solovchenko et al, 2019).

Los carotenoides son pigmentos que se localizan de forma natural en las frutas y verduras y que les confieren su tonalidad entre amarilla y roja. También presentan una serie de cualidades bioactivas, lo que los convierte en interesantes alternativas a los colorantes sintéticos que se emplean habitualmente en el sector alimentario (Cassani, et al, 2022). Los carotenoides, especialmente los beta-carotenos, son conocidos por aportar vitamina A y una fuerte actividad antioxidante (Ergun y Süslüoğlu, 2018).

Son pigmentos liposolubles que se hallan en muchos cultivos vegetales y a los que se les atribuyen beneficios para la salud como la prevención del cáncer y las enfermedades oculares cuando se consumen en la dieta humana (Kopsell y Kopsell, 2006). Según Swapnil et al (2021), existen diferentes tipos de carotenoides que intervienen en la supresión de ciertas enfermedades:

Licopeno: Inhibe el peligro de cáncer de próstata, diabetes, osteoporosis, trastornos cardiovasculares y cáncer en la boca.

β-caroteno: Inhibe las enfermedades visuales, artrosclerosis, esclerosis múltiple y protege a la piel de la luz UV.

Astaxantina: Previene enfermedades relacionadas con la edad, enfermedades crónicas inflamatorias, tumorigénicas y sobre el cáncer de pulmón.

β-criptoxantina: Inhibe los cánceres de pulmón.

Fitoeno y fitoflueno: Efecto protector de la piel por sus propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y absorbentes de rayos UV.

Luteína y Zeaxantina: Inhiben el deterioro de la retina.

2.2.7 Polifenoles

Las frutas, verduras, especias y hierbas contienen ácidos fenólicos y polifenoles. Estos compuestos son conocidos como subproductos naturales o metabolitos secundarios de los vegetales que se encuentran en la dieta diaria y proporcionan importantes beneficios al cuerpo humano como propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, anticancerígenas, antialérgicas, antihipertensivas, antivirales, entre otras ([Montenegro-Landívar et al, 2021](#)). Los polifenoles son metabolitos secundarios de las plantas que desempeñan un papel importante en la protección contra la radiación UV o la virulencia de los patógenos. Según las investigaciones epidemiológicas y los metaanálisis, el consumo constante de alimentos ricos en polifenoles proporciona protección contra el cáncer, las enfermedades cardiovasculares, la diabetes, la osteoporosis y los padecimientos neurológicos ([Pandey y Rizvi, 2009](#)).

Los polifenoles son metabolitos secundarios de origen vegetal que se encuentran ampliamente distribuidos en los alimentos. Los polifenoles se clasifican en flavonoides y ácidos fenólicos. Asimismo, los flavonoides se organizan en flavonas, flavononas, flavonoles, flavanoles e isoflavonas, y los ácidos fenólicos se clasifican generalmente en ácidos hidroxibenzoicos e hidroxicinámicos ([Abbas et al, 2016](#)). Los polifenoles son sustancias con potencial bioactivo que se distribuyen de forma natural en frutas y verduras.

Estas sustancias son indispensables para la salud, debido a los efectos favorables en la precaución de diversos males. El consumo de estas sustancias en cantidades óptimas tiene el potencial de prevenir ciertos padecimientos como la diabetes, la obesidad, el Parkinson, el Alzheimer, entre otras ([De Araújo et al, 2020](#)).

2.2.8 Antioxidante

Un antioxidante es un compuesto que es capaz de impedir o prevenir la oxidación celular, actuando a una concentración inferior a la del sustrato protegido. En la intervención de los antioxidantes contra la peroxidación lipídica intervienen diferentes vías. Los antioxidantes primarios son los que funcionan eliminando especies radicales y transformándolas en radicales más estables o en especies no radicales. Mientras que los antioxidantes secundarios descomponen los peróxidos, se unen a los iones metálicos prooxidantes y bloquean las enzimas oxidativas ([Pisoschi et al, 2020](#)).

Un antioxidante es un compuesto químico que, cuando está presente en bajas concentraciones, impide o previene la oxidación de una sustancia. Los compuestos antioxidantes actúan a través de varios procesos químicos: transferencia de átomos de hidrógeno, transferencia de un solo electrón y capacidad de quelar metales de transición. La importancia de los mecanismos antioxidantes estriba en comprender el significado biológico de los antioxidantes, sus posibles aplicaciones, su generación por síntesis orgánica o métodos biotecnológicos, o por la determinación de la actividad antioxidante ([Santos-Sánchez et al, 2019](#)).

Las sustancias fenólicas, abundantes en las plantas, son un componente indispensable de la nutrición humana y revisten gran atención por sus características antioxidantes y sus efectos provechosos para la salud (Shahidi y Ambigaipalan, 2015). En una investigación sobre el perfil de carotenoides, capacidad antioxidante y la cuantificación de polifenoles de los cultivares de zanahoria (*Daucus carota* L.) de tres localidades de Turquía se determinó durante dos años consecutivos el contenido de β -caroteno (41,60 - 71,2 mg/kg FW) y el α -caroteno (13,44 - 30,11 mg/kg FW). El contenido de polifenoles totales de las zanahorias osciló entre 114 - 306 mg de catequina/kg FW. La actividad antioxidante de las zanahorias, determinada por el ensayo TEAC, varió entre 25,9 y 86,6 μ mol TE/100 g FW (Koca et al, 2011).

2.2.9 Liofilización

La liofilización es un procedimiento de desecación muy conocido en el sector alimentario porque protege la actividad biológica de los componentes termosensibles, así como las cualidades organolépticas y nutricionales del producto. También hay que tener en cuenta que la liofilización aumenta la vida útil de los alimentos y facilita su transporte y almacenamiento (López-Quiroga, et al, 2012).

La tecnología de liofilización es una tecnología interdisciplinaria y compleja, combinada con la congelación y el secado al vacío, y se ha convertido en una tecnología importante para los medicamentos sensibles al calor y la conservación de alimentos (Liu, Zhang y Hu, 2021). La liofilización al vacío de materiales biológicos es una de las formas más eficaces de

eliminar el agua, produciendo resultados de alta calidad ([Bhatta et al, 2020](#)). De todos los procesos de secado, la liofilización suele producir productos de mejor calidad. Los principales inconvenientes son los elevados costos y los tiempos de proceso. La liofilización como proceso de presecado puede tener una influencia beneficiosa en los procesos de secado posteriores, como un mejor transporte de masa y una mejor conservación de la estructura ([Siebert et al, 2019](#)).

La liofilización (secado por congelación) se emplea principalmente para la industria alimentaria o farmacéutica con el fin de lograr una vida útil comercialmente viable ([Nireesha, et al, 2013](#)). Como nuevo método de deshidratación, la tecnología de liofilización tiene un gran valor de aplicación en la industria alimentaria. Muchos elementos influyen en el proceso de liofilización, incluyendo diferentes pretratamientos, temperatura de calentamiento, capacidad de carga, temperatura y tasa de congelación y grado de vacío, etc. El aspecto, la cantidad de agua, los antioxidantes, la rehidratación y los fenoles del producto se ven afectados por las diferentes condiciones de funcionamiento ([Liu, Zhang y Hu, 2021](#)).

La forma sólida del agua durante la liofilización mantiene la estructura primaria y la forma de los productos al tiempo que reduce mínimamente su volumen. Además, las bajas temperaturas del proceso permiten una conservación óptima de los nutrientes y las sustancias bioactivas. Esta técnica se ha aplicado con éxito a diversos materiales biológicos, como carnes, café, zumos, productos lácteos, células y bacterias, y es una práctica habitual para la penicilina, las hormonas, el plasma sanguíneo, los

preparados vitamínicos, etc. A pesar de sus muchas ventajas, la liofilización se ha considerado durante mucho tiempo como el método más caro para obtener un producto deshidratado, ya que consume entre cuatro y diez veces más energía que el secado normal por aire caliente (Bhatta et al, 2020). Según Haseley y Oetjen (2018), las ventajas y desventajas de la liofilización son:

Las ventajas de la liofilización pueden resumirse como sigue:

- El secado a bajas temperaturas previene el deterioro de los productos sensibles al calor.
- El producto líquido puede dosificarse con precisión.
- Durante el proceso, se puede controlar el contenido de humedad del producto final.
- El producto desecado puede tener una forma física visualmente atractiva.
- Debido a su gran superficie específica, el producto desecado se recupera rápidamente.

Las desventajas son las siguientes:

- El elevado costo de inversión, funcionamiento y mantenimiento.
- La complejidad del proceso y del equipo requiere de colaboradores cualificados y permanentemente formados.

2.2.9.1. Proceso de Liofilización

El proceso comprende tres pasos: congelación, secado primario y secado secundario. Mientras el agua se congela en el primer paso, los componentes disueltos en la formulación permanecen en el líquido residual, una fase denominada concentrado de congelación. En el punto de máxima

formación de hielo, el concentrado de congelación se solidifica entre los cristales de hielo que forman la red. En condiciones adecuadas de liofilización, el hielo se elimina por sublimación durante el secado primario, dejando el lioconcentrado restante con la misma estructura física y química que cuando el hielo estaba presente. El agua residual en el lioconcentrado se elimina en la etapa de secado secundario. En el estado sólido liofilizado, las reacciones de degradación química o física se inhiben o se desaceleran suficientemente, lo que da lugar a una mejor estabilidad a largo plazo. Además de la ventaja de una mejor estabilidad, las formulaciones liofilizadas también proporcionan una fácil manipulación durante el envío y el almacenamiento ([Nireesha, et al, 2013](#)).

2.3 Definición de términos básicos

Antioxidante: Un antioxidante es un compuesto químico que, cuando está presente en bajas concentraciones, impide o previene la oxidación de una sustancia o compuesto ([Santos-Sánchez et al, 2019](#)).

Carotenoides: Son pigmentos liposolubles que se hallan en muchos cultivos vegetales y a los que se les atribuyen beneficios para la salud como la prevención del cáncer y las enfermedades oculares cuando se consumen en la dieta humana ([Kopsell y Kopsell, 2006](#)).

Liofilización: La liofilización es un procedimiento de desecación muy conocido en el sector alimentario porque protege la actividad biológica de los componentes termosensibles, así como las cualidades organolépticas y nutricionales del producto ([López-Quiroga, et al, 2012](#)).

Microencapsulación: Es una tecnología cada vez más popular en la ciencia de los alimentos utilizada para mejorar la estabilidad y controlar la liberación de aromatizantes, colorantes, antioxidantes, nutrientes, enzimas, conservantes y microorganismos ([Ribeiro y Veloso, 2021](#)).

Polifenoles: Los polifenoles son metabolitos secundarios de las plantas que desempeñan un papel importante en la protección contra la radiación UV o la virulencia de los patógenos ([Pandey y Rizvi, 2009](#)).

Pigmentos vegetales: Los pigmentos vegetales se encuentran entre los compuestos químicos naturales más importantes, que producen varios colores y desempeñan diversas funciones. Son nutrientes esenciales y algunos son provitaminas para los seres humanos y los animales ([Solovchenko et al, 2019](#)).

CAPÍTULO III.

METODOLOGÍA

3.1 Lugar de ejecución

La investigación se llevó a cabo en los laboratorios de Química Analítica (Lab. C-2) y Biología-Microbiología (Lab. E-2) de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres (USMP).

3.2 Materia prima

En la presente investigación se empleó como materia prima la zanahoria (*Daucus carota* L.) de la variedad Royal Chantenay obtenida durante el proceso de prensado en la elaboración de jugo de zanahoria de la empresa Food Pack S.A.C. El método de conservación fue en cámara de refrigeración y el material con el cual se recibió fue en bolsa de polietileno.

3.3 Materiales y equipos

Lista de materiales de laboratorio:

- Beakers de 250 ml, 400 ml, 1000 ml
- Cuchara espátula
- Papel Whatman N° 40
- Embudo de vidrio
- Soporte universal
- Tamices

Lista de equipos de laboratorio:

- Refrigeradora LG
- Mufla Thermo Scientific
- Estufa Memmert
- Balanza de humedad Ohaus
- Balanza analítica Sartorius
- Centrífuga Eppendorf 5702
- Licuadora Oster
- Potenciómetro Orion 3
- Refractómetro Rudolph
- Liofilizador labconco

3.4 Diagrama del proceso

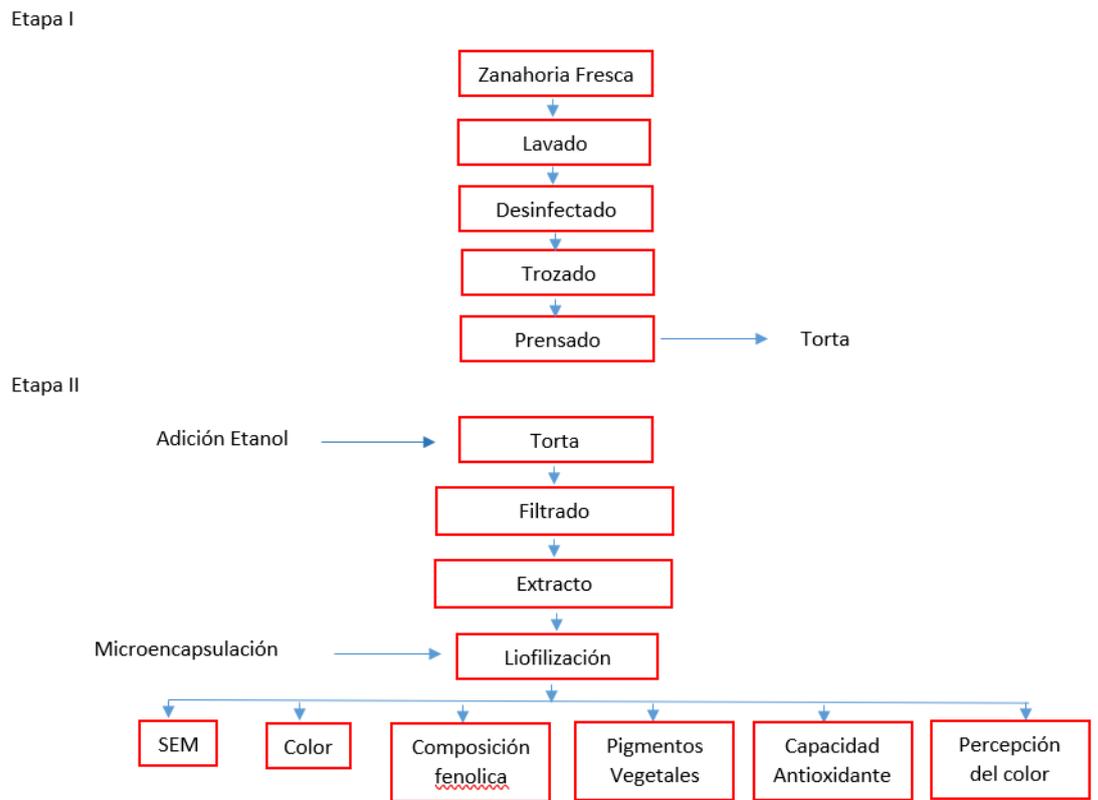


Figura 2. Diagrama del proceso

3.4.1 Desarrollo del proceso

Recepción

La zanahoria de la variedad Chantenay es recepcionada en jabas de plástico.

Lavado y Desinfectado

Son lavadas y desinfectadas con (Neofrut-Peracetico)

Cortado

Respectivamente son cortadas con cuchillo de acero en cuatro partes.

Prensado

Teniendo los cortes listos de zanahoria estos son triturados por un molino, luego por un prensado.

Torta

Comienza la segunda etapa. A la torta se le adiciona etanol, este mismo ayuda a la recuperación de la mayor cantidad de caroteno que tiene la matriz.

Filtrado

El filtrado nos ayuda con la obtención del extracto de zanahoria

Extracto de Zanahoria

Es la Torta más etanol ya recuperado por el filtrado.

Liofilización

Se adiciona Maltodextrina, encapsulante. Posteriormente Se llevó a cabo la liofilización al vacío.

3.5 Métodos

3.5.1 Microencapsulación extracto etanólico

El extracto etanólico fue preparado utilizando extracción asistida por ultrasonido. A la torta residual se le adiciona etanol al 80% a una proporción 1:10 peso/volumen usando baño ultrasonido (Branson) a 40 KHz, 30°C por 30 min, la misma que ayudara a la recuperación del caroteno. El extracto etanólico fue encapsulado con maltodextrina que alcanzo 12%. Posteriormente la mezcla fue mezclada utilizando un homogenizados a 5000 rpm durante 5 minutos. Seguidamente la mezcla homogenizada fue llevada a un abatidor para llegar a una temperatura de -20°C. Cuando se alcanzo

la temperatura la muestra se llevó a un proceso de liofilización a -107°C , 0.05 mbar por 24 horas. El polvo microencapsulado fue pulverizado y empacado al vacío y guardado a -20°C antes de los análisis.

3.5.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es una de las herramientas más flexibles para examinar y analizar la morfología de la microestructura y las caracterizaciones de la composición química (Zhou et al, 2006). La microscopía electrónica de barrido (SEM), a menudo conocida como análisis SEM o método SEM, se utiliza en una gran variedad de disciplinas en todo el mundo. Es una tecnología viable para analizar materiales orgánicos e inorgánicos a escala nanométrica y micrométrica (μm). El SEM funciona con aumentos extremos de hasta 300.000x e incluso 1000000x (en algunas versiones más recientes) para proporcionar imágenes muy precisas de una amplia gama de materiales (Mohammed y Abdullah, 2018).

3.5.3 Medida del color por el sistema CIE L*a*b

Una representación tridimensional de todas las posibles percepciones del color se denomina espacio de color (Durmus, 2020). El sistema de color CIELAB, a menudo conocido como CIE L* a* b*, proporciona la conexión cuantitativa entre los colores en tres ejes: El valor L* denota la luminosidad, mientras que los valores a* y b* denotan las coordenadas de cromaticidad. En el diagrama del espacio

de color, L^* se representa en un eje vertical con valores de 0 (negro) a 100 (blanco). El valor a^* indica el elemento rojo-verde de un color, donde $+a^*$ (positivo) y $-a^*$ (negativo) señalan los valores rojo y verde, respectivamente. Los componentes amarillo y azul se representan en el eje b^* como valores $+b^*$ (positivo) y $-b^*$ (negativo), respectivamente. El centro del plano es neutro o acromático. La distancia al eje central representa el croma (C^*_{ab}), o saturación del color y el ángulo en los ejes de cromaticidad representa el tono (h_{ab}) según el método CIELAB (Ly et al, 2019).

3.5.4 Determinación de pigmentos vegetales

Los pigmentos de las plantas se determinaron utilizando la metodología propuesta por Lichtenthaler y Buschmann (2001). Una cantidad de 0.1 g de muestra aproximadamente se diluyo con 3 mL de metanol puro. Posteriormente la mezcla se agito con vortex durante toda la noche en oscuridad. Tras centrifugar la mezcla durante 30 minutos a 3500 rpm, el sobrenadante fue recuperado y colocado en una celda de vidrio para realizar las curvas de espectro de 400 a 700 nm (la región correspondiente a los pigmentos clorofílicos no fue observados). El cálculo del contenido de carotenoides en la muestra fue determinado a partir de la siguiente ecuación ($\mu\text{g/mL}$) y posteriormente convertidos a $\text{mg}/100\text{ g}$.

$$\text{Carotenoides } (\mu\text{g/mL}) = \frac{1000A_{470} - 1.63c_a - 104.96c_b}{221}$$

Donde: A_{470} , es la absorbancia a esta longitud de onda, c_a y c_b , es la clorofila a y b, en nuestro caso los pigmentos clorofílicos no se observan por lo tanto se considera cero "0" (Figura 5).

3.5.5 Determinación de compuestos fenólicos

La cuantificación de polifenoles totales se llevó a cabo a través de la técnica estándar de Folin-Ciocalteu con algunas modificaciones. Una cantidad de muestra de 0.2 g aproximadamente fue sometida a extracción con 5.0 mL de una disolución de acetona, agua y ácido acético (70/29.5/0.5 v/v/v). La reacción fue provocada por la incorporación de 100 μ L de extracto y 750 μ L de Folin-Ciocalteu (0.2 N). Seguidamente 750 μ L de carbonato de sodio al 7.5% fue añadido. La reacción se dejó durante 2 horas y luego los valores de absorbancia fueron colectados a una longitud de onda de 725 nm (Boeing et al., 2014). Los resultados del ensayo se interpretaron en mg de ácido gálico semejante por 100 g de muestra (mg GAE/100 g).

3.5.6 Determinación antioxidante

La capacidad antioxidante se llevó a cabo utilizando la técnica estándar de Brand-Williams et al., 1995. Una alícuota de 50 μ L del producto reaccionó con 950 μ L del reactivo de DPPH (2,2-diphenyl-1-picrilhidrazilo) a una concentración de 100 μ mol/L. La reacción se desarrolló durante 30 minutos y las lecturas de absorbancia fueron recolectadas a 515 nm. La expresión de los resultados se presentó en

porcentaje de inhibición del radical DPPH y luego se convirtió a mmol de trolox equivalente por 100 g de muestra (mmol TE/100 g).

3.5.7 Percepción cromática de las partículas liofilizadas del extracto residual de zanahoria en una matriz láctea

La percepción cromática de las partículas liofilizadas del extracto residual de la torta de zanahoria se llevó a cabo incorporando diferentes cantidades de polvo liofilizado de torta de zanahoria (0.0, 0.25, 0.5, 1.0 y 2.0 g). Se utilizó un mezclador Blender a 200 rpm durante 15 s para llevar a cabo la homogenización. Luego las muestras se dejaron en reposo durante 2 horas. La adquisición de las imágenes fue hecha con una cámara digital Nikon con zoom automático. Los histogramas de color fueron construidos utilizando un software libre ImageJ del National Institutes of Health. La primera parte del estudio correspondió a la medida del color en el sistema RGB y la conversión al sistema CIELAB fue conducido utilizando la enciclopedia de color ColorHexa (<https://www.colorhexa.com/>). La información de los parámetros cromáticos se obtuvo a partir de 5 fotografías por tratamiento. La coordenada cromática de la claridad (L^*) y los parámetros de color a^* y b^* se obtuvieron a partir del software mientras que la cromaticidad (C^*_{ab}) y ángulo de tono (h_{ab}) fueron obtenidos a partir de las siguientes ecuaciones.

$$C^*_{ab} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

$$h_{ab} = \text{atan} \frac{b^*}{a^*}$$

3.6 Análisis estadístico

Para evaluar y analizar los datos en tablas y gráficos, así como su interpretación se usó la estadística descriptiva correspondiente. Los análisis de datos se realizaron con tres repeticiones y los resultados se expresaron como media \pm desviación estándar (SD). El análisis de varianza (ANOVA) y la prueba estadística de Tukey fueron conducidas usando el paquete STATISTICA version 8.0 (StatSoft, Inc., Tulsa, Oklahoma, USA).

CAPÍTULO IV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

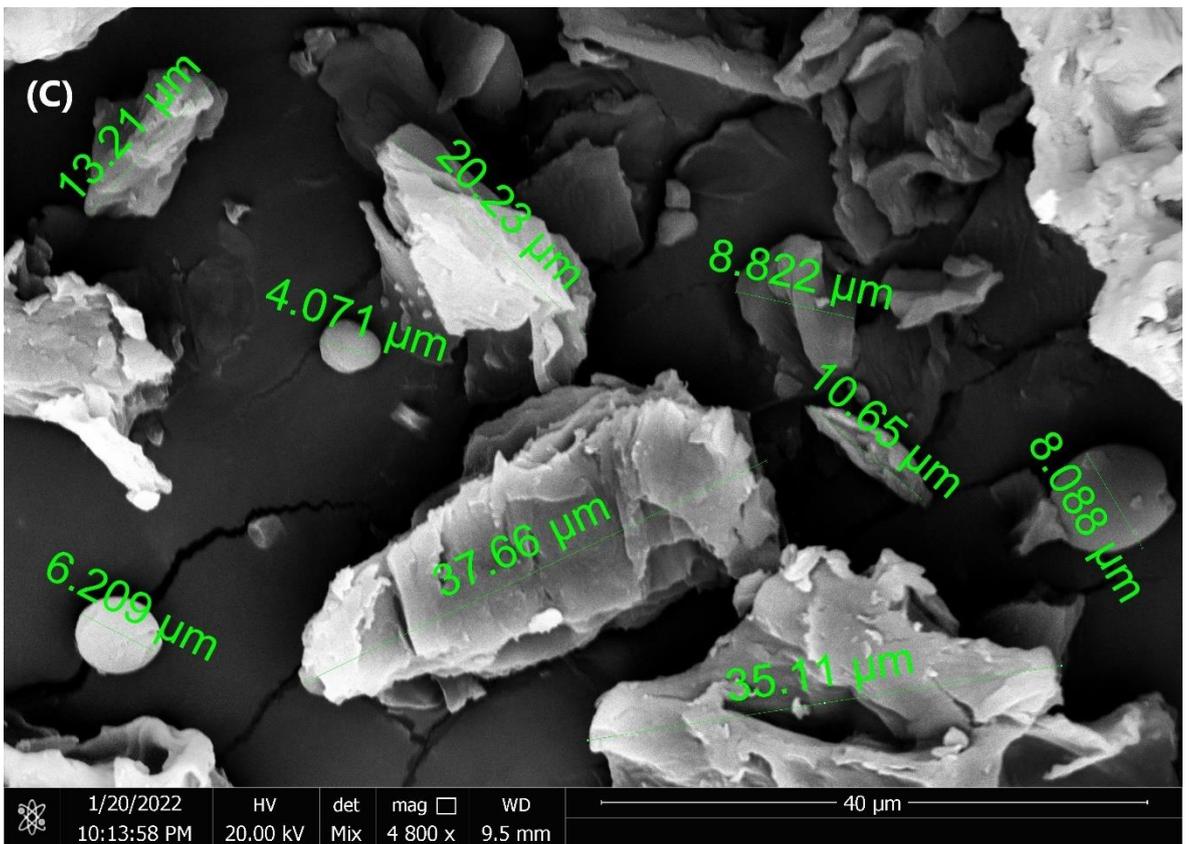
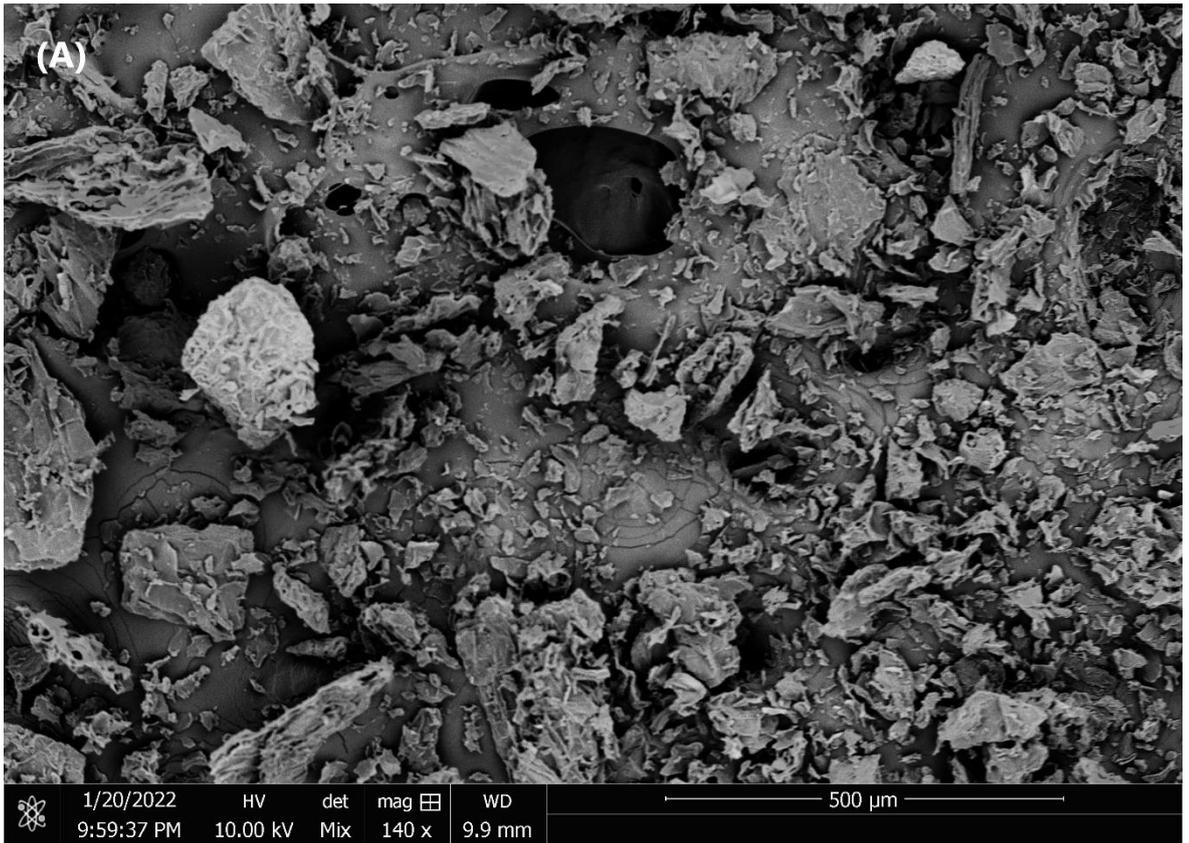
4.1 Microestructura del polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria

La morfología de la superficie del polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria (Figura 3) fue obtenido mediante microscopia electrónica de barrido (SEM) (Figuras 4A-C). Las microfotografías corresponden a los gránulos pulverizados del liofilizado de zanahoria (140 x, 600 x, y 4800 x).



Figura 3. Polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria empacado al vacío.

El método de microscopía electrónica de barrido admite el estudio de la integridad estructural, así como la determinación del tamaño y la forma de las partículas del polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria. En este estudio el análisis de SEM mostró que los gránulos de la muestra presentaron diferentes formas irregulares y regulares. Entre las formas se observaron amorfas, longitudinales y esféricas. Así como diferentes tamaños que variaron entre 4.071 a 37.66 μm .



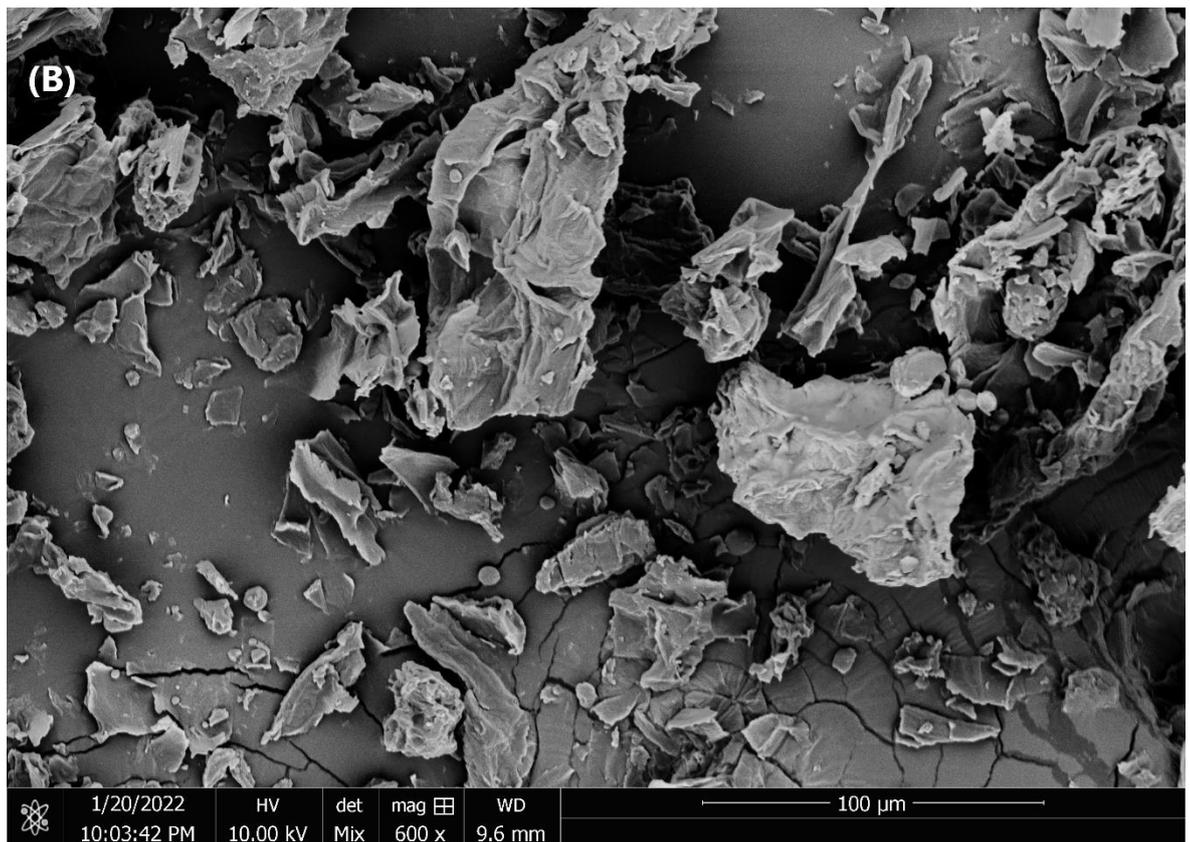


Figura 4. Microfotografía del polvo liofilizado de una magnitud de 140 x por 500 μm (A); de una magnitud de 600 x por 100 μm (B); y de una magnitud de 4800 x por 40 μm (C).

Vénica et al. (2020) reportaron la influencia de la adición del polvo de fibra de zanahoria para un yogurt batido. Estructuralmente el polvo de fibra de zanahoria mostró áreas amorfas y longitudinales. Por otro lado, otras harinas provenientes de otros subproductos mostraron estructuras esféricas y ovaladas (De Dios-Avila et al., 2022). En algunos casos como ocurre en el polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria se encontraron cubiertos por laminas que podrían estar compuestas de proteínas y fibras (Madruga et al., 2019).

4.2 Propiedades cromáticas, compuestos bioactivos y actividad antioxidante del polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria

Las propiedades cromáticas juegan un rol importante ya que proporcionan el color en los alimentos y también se pueden utilizar como colorantes naturales en aplicaciones comerciales. En el caso de la torta de zanahoria, el 50% corresponde a este subproducto (Tiwari et al., 2019) sin embargo este recurso es una rica fuente de carotenoides, fibras dietéticas y su utilización podría incorporarse en la cadena productiva. Por otro lado, también se ha informado que estos subproductos de la pulpa de zanahoria contienen polifenoles y proporcionan una actividad antioxidante (Shyamala y Jamuna, 2010). En la Tabla 5 se presentan las propiedades cromáticas, bioactivas y bioactividades del polvo liofilizado del extracto de la torta de zanahoria.

Tabla 5. Propiedades cromáticas, carotenoides totales, polifenoles y actividad antioxidante del polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria

Parametros	Valores		Color
	Media	DS	
<i>R</i>	240	1.37	
<i>G</i>	164	1.60	
<i>B</i>	118	1.48	
<i>L</i> *	73.80	0.48	
<i>a</i> *	23.42	0.73	
<i>b</i> *	35.25	0.48	
<i>C</i> * _{ab}	42.32	0.50	
<i>h</i> _{ab}	56.41	0.98	
Carotenoides (mg/100g)	6.32	0.05	

Polifenoles (mg GAE/100g)	98.61	2.55
DPPH (mmol TE/100g)	2.33	0.16

En la [Tabla 5](#) se observa las propiedades cromáticas del polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria. Diferentes sistemas cromáticos se han utilizado para expresar los parámetros cromáticos de los alimentos. La Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) ha estandarizado el espacio de color $L^*a^*b^*$ (CIELAB). Este sistema de color es el más completo y es usado convencionalmente para describir el color visual para el ojo humano ([Camelo y Gómez, 2004](#)). En el sistema de color RGB la muestra de polvo liofilizado del extracto de la torta de zanahoria presenta valores de 240, 164 y 118 unidades, respectivamente. Mientras que en el sistema CIELAB estos valores fueron $L^*=73.80$; $a^*=23.42$; y $b^*=35.25$ unidades. El croma (C^*_{ab}) de esta muestra fue 42.42 y el tono (h_{ab}) fue de 56.41° unidades. Estos resultados son comparables con los datos obtenidos por [Keskin et al. \(2019\)](#) que mencionan que el polvo de pulpa de zanahoria fresca presento valores $L^*=49.79$; $a^*=21.20$; $b^*=37.54$; $C^*_{ab}=43.11$; y $h_{ab}=60.55^\circ$. Estos datos son muy parecidos a los conseguidos en el polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria, con una variación muy marcada en la claridad (L^*), esta variación podría deberse al tipo de muestra con un mayor contenido de carotenoides. Sin embargo, cuando se somete a un procedimiento como la deshidratación por microondas de 100 a 500 watts, estos valores fueron $L^*=61.16-74.33$; $a^*=10.13-22.18$; $b^*=34.47-39.66$; $C^*_{ab}=35.95-44.98$; y $h_{ab}=60.46-74.35^\circ$. Estos resultados confirman

que la utilización del tratamiento térmico o la deshidratación por microondas es un factor crucial en la naturaleza básica del producto (Keskin et al., 2019).

Por otro lado, el contenido de carotenoides en esta muestra fue de 6.32 ± 0.05 mg/100 g. Shyamala y Jamuna (2010) reportaron un contenido de 4.00 mg/100 g de muestra en subproducto de pulpa de zanahoria. Upadhyay et al. (2008) reportaron que el orujo deshidratado de zanahoria presento un contenido de β -caroteno entre 9.87 a 11.57 mg/100 g de muestra. En un estudio comparativo entre la deshidratación por aire caliente y la liofilización en el perfil de carotenoides en subproducto de mango se encontró que el aire caliente presento mayor contenido de carotenoides que el tratamiento por liofilización, especialmente en todo-trans- β -caroteno, 9-cis- β -caroteno, todo-trans-luteína, and 13-cis- β -criptoxantina (de Ancos et al., 2018).

Asimismo, se observa en la Figura 5 la curva de espectro del extracto metanólico del polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria. La curva de espectro revela que es una fuente de carotenoides, las longitudes de onda más relevantes son 424, 444, y 470 nm. Estas longitudes de onda están relacionadas con el tipo de disolvente utilizado, algunos disolventes utilizados para la recuperación de carotenoides son acetona, éter de petróleo, etanol, metanol, y hexano (Kuczynska et al., 2015).

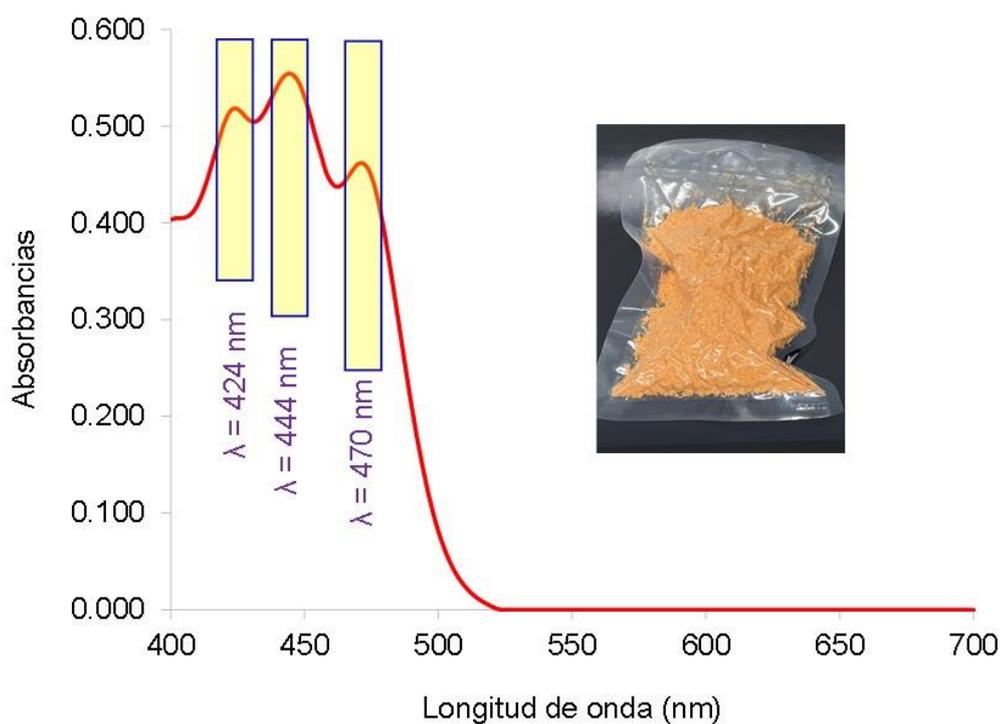


Figura 5. Curva de espectro obtenido a partir de un extracto metanólica del polvo (celda de cuarzo de 1 cm de paso óptico)

Los polifenoles totales encontrados del polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria se encuentran alrededor de 98.61 ± 2.55 mg GAE/100g. [Shyamala y Jamuna \(2010\)](#) reportaron que la composición de polifenoles expresado en mg de ácido tánico por 100 g de muestra de orujo de pulpa de zanahoria para diferentes sistemas extractivos (agua, etanol y metanol) fluctuó entre 110 a 250 mg TAE/100g. Por otro lado, varios tratamientos para la deshidratación de pulpa de zanahoria como la deshidratación al vacío, liofilización, deshidratación por aire caliente, y microondas presentaron diferentes contenidos. Según [Araújo-Rodrigues et al. \(2021\)](#) demostraron que la composición de polifenoles en la pulpa y polvo de zanahoria fluctuó entre 73.47 a 85.49 mg GAE/100 g de muestra. Estos

valores son parecidos a los obtenidos en este estudio. Sin embargo, la similitud de los resultados no siempre está sujeta al tipo de matriz alimentaria, sino también a los métodos analíticos utilizados, técnicas extractivas para la recuperación de polifenoles (Abderrahim et al., 2015).

La valoración de la actividad antioxidante de los extractos del polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria fue evaluada mediante la técnica del porcentaje de inhibición del radical DPPH. La actividad antioxidante se monitorea a diferentes concentraciones del extracto de zanahoria (Figura 6).

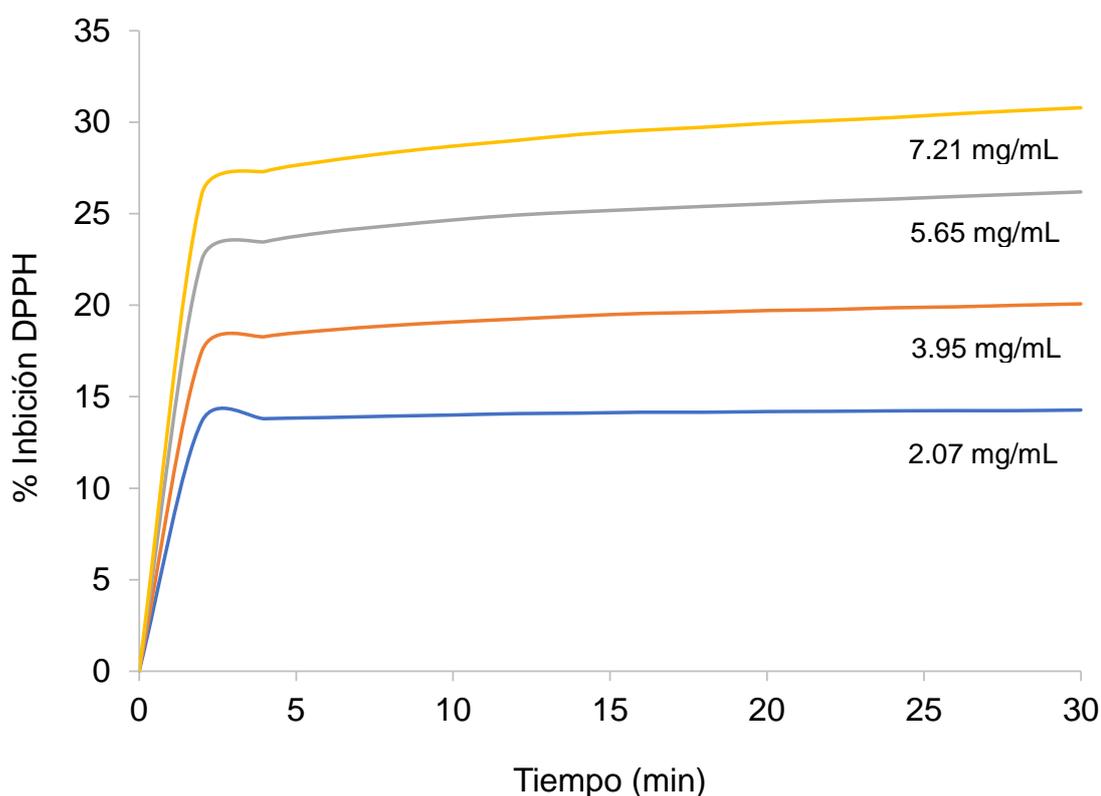


Figura 6. Porcentaje de inhibición del radical DPPH de diferentes concentraciones del polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria.

La actividad de los diferentes extractos para inhibir el radical DPPH está relacionado al contenido de compuestos fenólicos en el extracto (acetona/agua/ácido acético; 70/29.5/0.5). Como se observa en la [Figura 6](#) a mayor concentración mayor capacidad antioxidante. En la medida que la concentración de los extractos (2.07, 3.95, 5.65, y 7.21 mg/mL) se incrementa el porcentaje de inhibición en el tiempo fue mayor, a saber, 13.20, 18.09, 23.43, y 27.38% respectivamente. Por otro lado, la actividad antioxidante en la muestra fue de 2.33 ± 0.16 mmol TE/100 g. Varios autores han reportado que los subproductos de la zanahoria contienen altas cantidades de bioactivos residuales, con poco valor comercial. Estos fitoquímicos podrían utilizarse de manera rentable para la fortificación y el desarrollo de alimentos funcionales, productos farmacéuticos y medicamentos ([Šeregelj et al., 2020](#)).

4.3 Percepción cromática de las partículas liofilizadas del extracto residual de la torta de zanahoria en una matriz láctea

La aplicación comercial de los subproductos del sector alimentario a la cadena de valor se ha incrementado en los últimos años alrededor de mundo ([Rámirez et al., 2021](#)). El esquema de la pérdida de los alimentos y la aplicación de los subproductos está orientado de acuerdo con las indicaciones de la FAO de las Naciones Unidas ([Figura 7](#)).

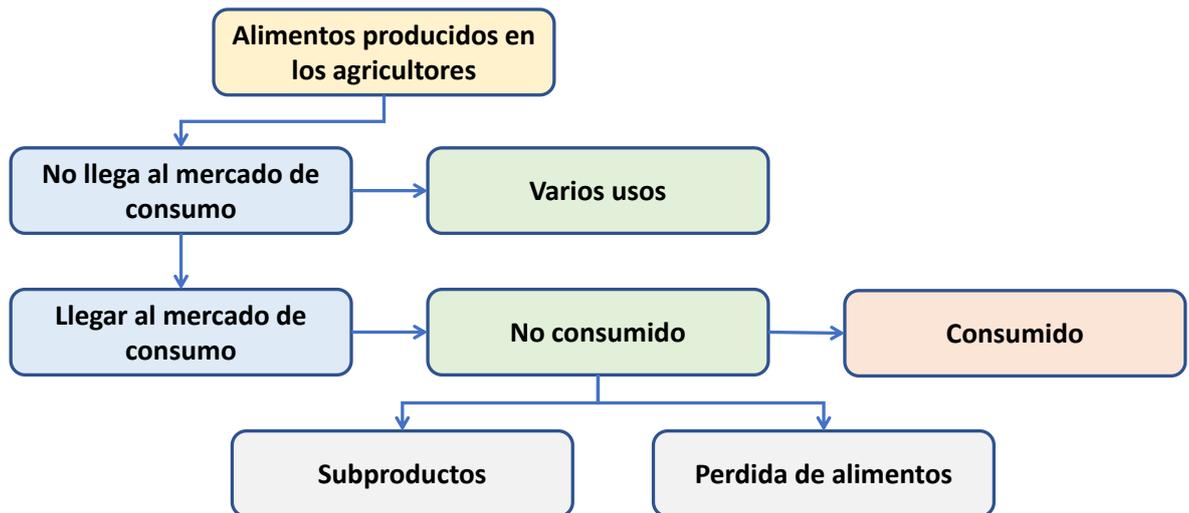


Figura 7. Representación esquemática de la pérdida de los alimentos y la generación de subproductos.

En este contexto, el polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria fue incorporado en una matriz láctea para evaluar el efecto de los colorantes naturales existentes en la matriz desde el punto de vista cromático. En la [Tabla 6](#) se resumen los parámetros cromáticos de un yogurt enriquecido con diferentes concentraciones del polvo liofilizado de zanahoria. Los resultados observados de las propiedades cromáticas CIELAB muestran que el polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria puede funcionar como colorante natural. Los parámetros cromáticos obtenidos para los diferentes tratamientos muestran diferencia significativa según la prueba de Tukey a $p < 0.05$.

Tabla 6. Parámetros cromáticos de un yogurt enriquecido con polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria a diferentes cantidades.

Trat.	Entrada de color	L^*	a^*	b^*	C^*_{ab}	h_{ab}	Vista
2.0 g	rgb 232 170 109	74.19	15.95	40.16	43.22	68.33	
	rgb 228 167 110	73.06	16.01	38.13	41.36	67.23	
	rgb 230 172 124	74.69	15.46	32.91	36.37	64.84	
	rgb 222 165 112	71.96	14.81	35.57	38.54	67.38	
	rgb 225 167 117	72.84	15.43	34.12	37.46	65.66	
1.0 g	rgb 223 185 149	77.613	8.569	23.395	24.91	69.88	
	rgb 211 178 145	74.65	7.11	21.31	22.47	71.54	
	rgb 209 170 129	72.15	8.65	26.51	27.89	71.93	
	rgb 217 184 151	76.84	7.02	21.17	22.31	71.65	
	rgb 211 176 144	74.13	8.05	21.14	22.63	69.14	
0.50 g	rgb 226 200 167	81.984	4.159	19.872	20.30	78.18	
	rgb 224 203 176	82.75	3.10	16.14	16.44	79.11	
	rgb 224 203 174	82.70	2.81	17.14	17.37	80.67	
	rgb 219 198 169	80.91	2.85	17.22	17.46	80.60	
	rgb 214 197 169	80.23	1.50	16.21	16.28	84.70	
0.25 g	rgb 203 192 172	78.096	0.512	11.463	11.47	87.44	
	rgb 210 193 167	78.82	1.81	15.26	15.37	83.21	
	rgb 213 199 173	80.74	0.67	14.78	14.80	87.39	
	rgb 214 198 172	80.55	1.42	15.06	15.13	84.61	
	rgb 230 216 190	86.82	0.62	14.55	14.57	87.56	
0.0 g	rgb 222 218 189	86.67	-3.45	14.77	15.17	-76.83	
	rgb 227 227 199	89.57	-4.71	13.69	14.48	-71.00	
	rgb 226 227 196	89.43	-5.53	15.04	16.04	-69.79	
	rgb 220 219 191	86.82	-4.37	13.90	14.58	-72.53	
	rgb 227 226 196	89.25	-4.67	14.80	15.53	-72.48	
2.00 g		73.35 ^c	15.54 ^a	36.18 ^a	39.39 ^a	66.69 ^d	

1.00 g	75.08 ^c	7.88 ^b	22.71 ^b	24.04 ^b	70.83 ^c
0.50 g	81.72 ^b	2.89 ^c	17.32 ^c	17.57 ^c	80.65 ^b
0.25 g	81.01 ^b	1.01 ^d	14.23 ^d	14.27 ^c	86.04 ^a
0.00 g	88.35 ^a	-4.55 ^e	14.45 ^d	15.16 ^c	-72.53 ^e

Los valores medios en cada columna con letras distintas son significativamente diferentes entre los diferentes tratamientos (prueba de Tukey, $p < 0.05$).

Estos valores obtenidos denotan que a diferentes concentraciones de polvo liofilizado presentan mayor contenido de carotenoides que están relacionados con el parámetro cromático C^*_{ab} (Best et al., 2020). Estos resultados son confirmados en la Figura 8, cuando se incrementa la cantidad de muestra el croma también se incrementa y la claridad disminuye (L^*).

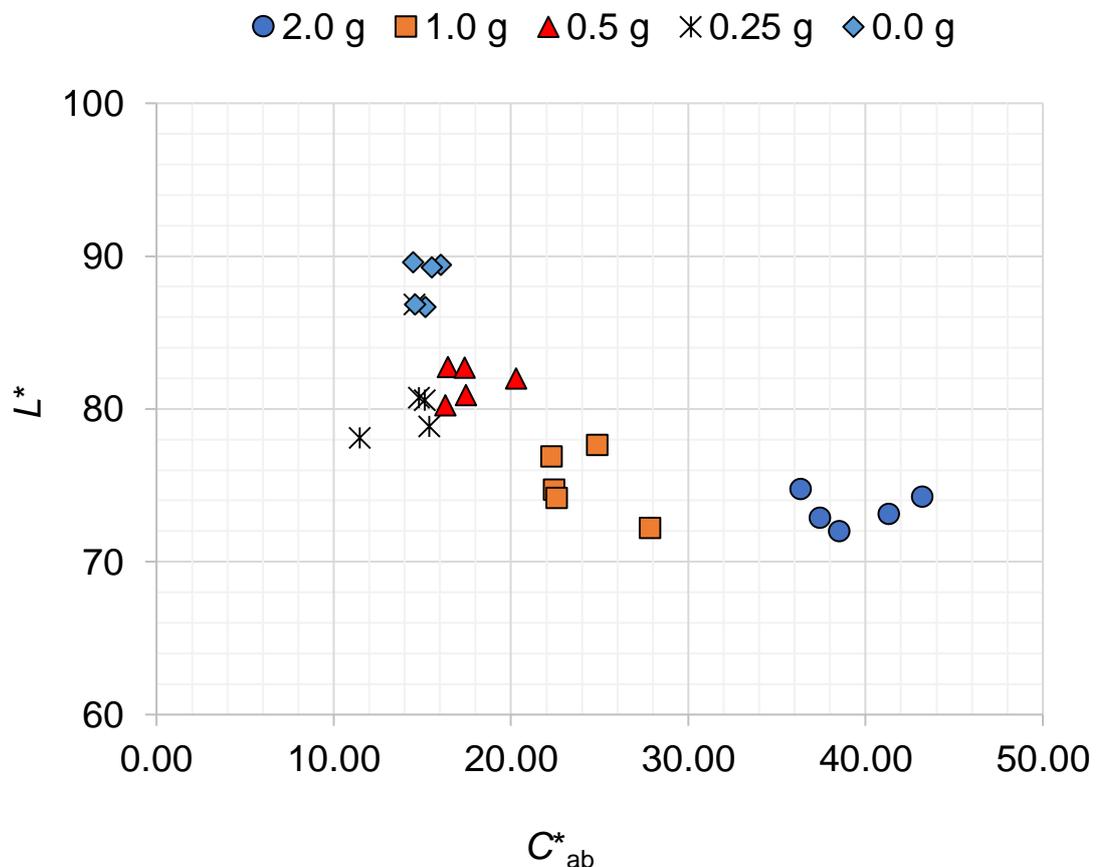


Figura 8. Representación esquemática del croma (C^*_{ab}) vs claridad (L^*)

En la [Figura 9](#) se presenta la relación entre el parámetro cromático b^* vs croma (C^*_{ab}). Varias matrices alimentarias ricas en carotenoides han demostrado este mismo efecto. Según [Itle y Kabelka \(2009\)](#) han reportado relaciones similares para calabazas y calabacines, donde el contenido de carotenoides frente al coma y parámetro b^* fueron de 0.87 para luteína, mientras para el contenido total de carotenoides fue de 0.76.

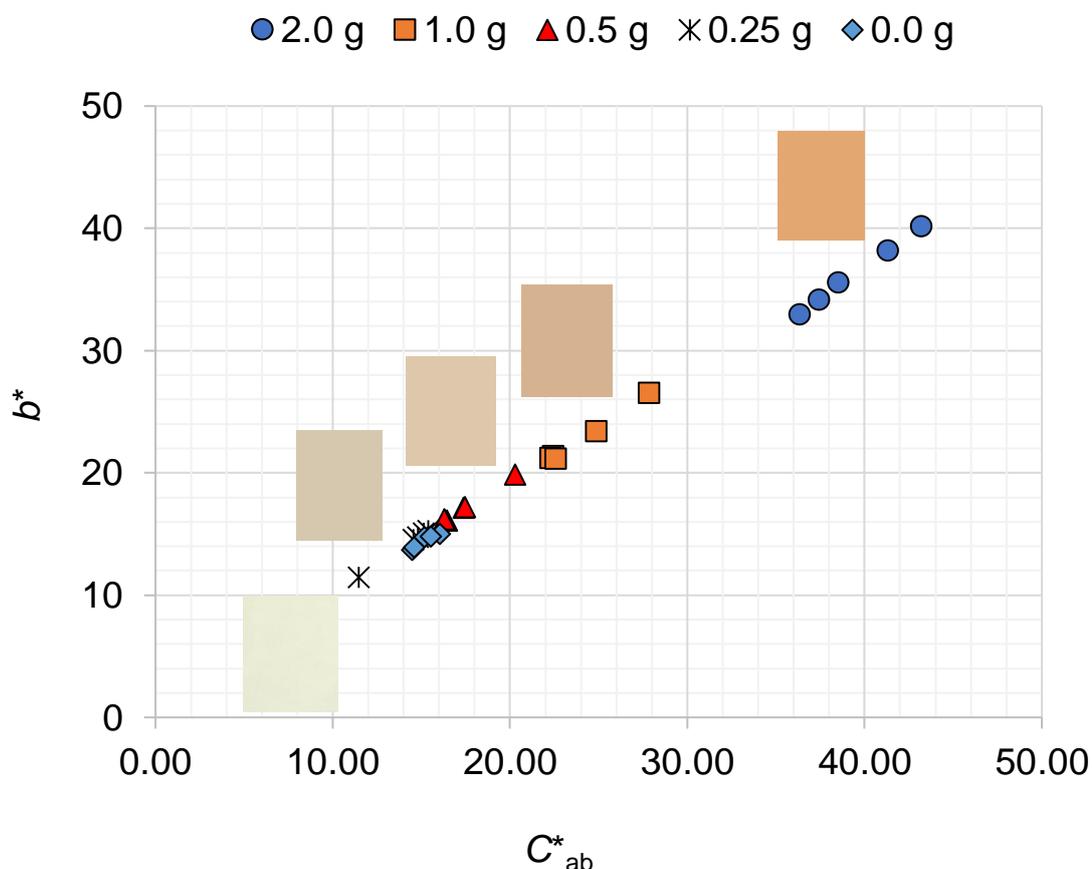


Figura 9. Representación esquemática del C^*_{ab} vs b^*

En la [Figura 10](#) se presenta la descripción de la coordenada cromática a^* vs b^* , valores positivos se ha observado en las muestras en la que se ha incorporado el polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria $+a^*$ (rojo) y $+b^*$ (amarillo). Sin embargo, la muestra control (0.00 g) presentó valores negativos para el parámetro cromático a^* (-4.55 ± 0.75 unidades). Los

colores subjetivos que se podrían determinar para las muestras son rojo-naranja, amarillo-naranja vivo, amarillo-anaranjado opaco y amarillo-naranja. Mientras aquellos que presentan a^* (negativo) y b^* (positivo) presentan colores subjetivos de amarillo opaco, amarillo claro, amarillo blanquecino claro (Itle y Kabelka, 2009).

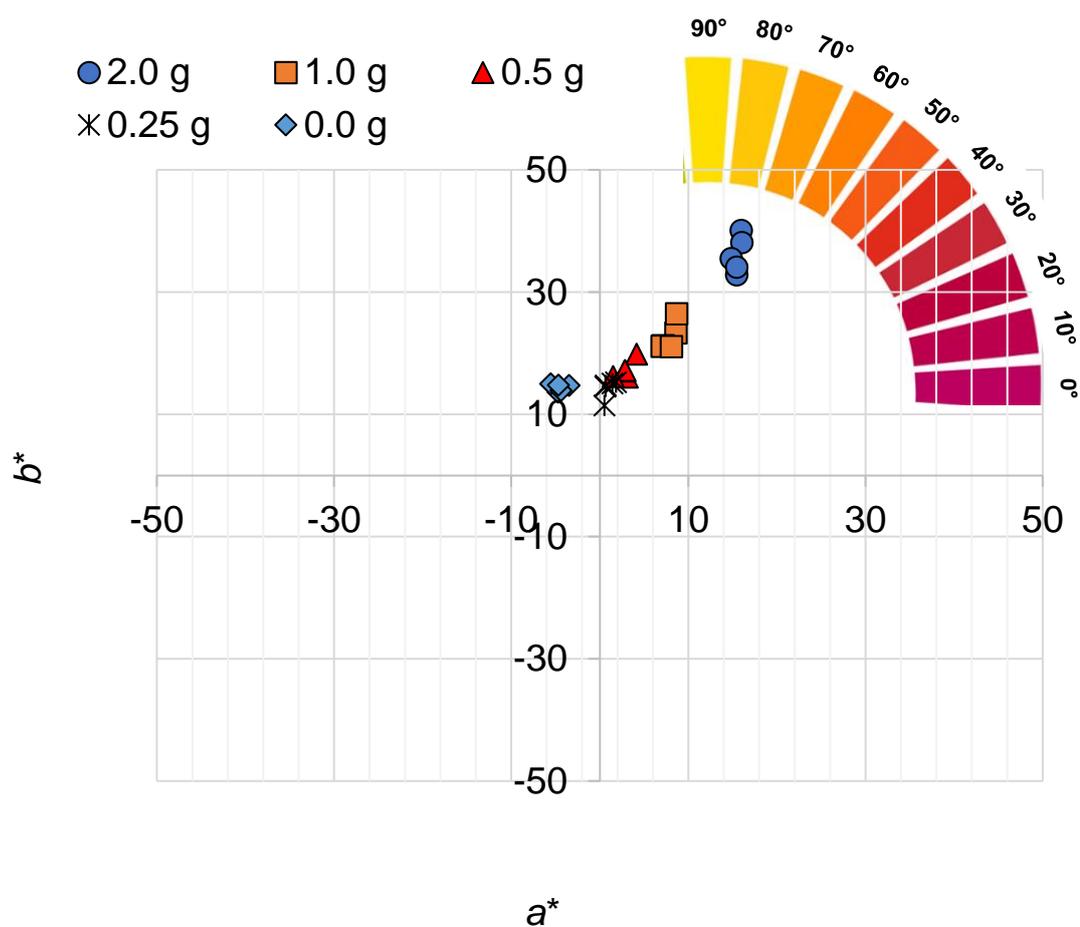


Figura 10. Representación esquemática de los parámetros cromáticos a^*b^* .

Los valores cromáticos donde se ha incorporado el polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria presentan un ángulo de tono (h_{ab}) que va de 66.69° a 86.04° grados (Tabla 6). Estos valores son corroborados en la representación esquemática a^*b^* (Figura 10).

CONCLUSIONES

1. Los gránulos liofilizados del extracto residual de la torta de zanahoria presentan diferentes formas irregulares y regulares. Entre las formas se observaron amorfas, longitudinales y esféricas. Así como diferentes tamaños que variaron entre 4.071 a 37.66 μm .
2. En el sistema de color RGB la muestra de polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria presenta valores de 240, 164 y 118 unidades, respectivamente. Mientras que en el sistema CIELAB estos valores fueron $L^*=73.80$; $a^*=23.42$; y $b^*=35.25$ unidades. El croma (C^*_{ab}) de esta muestra fue 42.42 y el tono (h_{ab}) fue de 56.41° unidades.
3. El contenido de carotenoides del polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria fue de 6.32 ± 0.05 mg/100 g.
4. Los polifenoles totales del polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria se encuentra alrededor de 98.61 ± 2.55 mg GAE/100g.
5. La actividad antioxidante del polvo liofilizado del extracto residual de la torta de zanahoria fue de 2.33 ± 0.16 mmol TE/100 g. En la medida que la concentración de los extractos (2.07, 3.95, 5.65, y 7.21 mg/mL) se incrementa el porcentaje de inhibición en el tiempo fue mayor, a saber, 13.20, 18.09, 23.43, y 27.38% respectivamente.
6. Los parámetros cromáticos CIELAB de un yogurt enriquecido con diferentes concentraciones del polvo liofilizado de zanahoria muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) como colorante natural.

RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios sobre la precipitación, la coprecipitación y la encapsulación de antioxidantes alimentarios, evaluando los efectos de los parámetros del proceso en las actividades antioxidantes mediante diferentes ensayos.
2. Almacenar los polvos liofilizados a diferentes temperaturas con o sin acceso a la luz del día, y analizar mensualmente la variabilidad en cuanto al color, el contenido de carotenoides y la actividad antioxidante durante tres meses.
3. Determinar el efecto de la microencapsulación utilizando varias concentraciones de maltodextrina en diferentes variedades de Zanahoria (*Daucus carota* L).

ANEXOS

	Pagina
Anexo 1. Bandeja de zanahorias de la variedad Royal Chantenay. _____	50
Anexo 2. Extracto residual de la torta de zanahoria. _____	50
Anexo 3. Liofilización al vacío de la torta residual de zanahoria. _____	51
Anexo 4. Muestra liofilizada _____	51

Anexo 1.

Bandeja de zanahorias de la variedad Royal Chantenay.



Anexo 2.

Extracto residual de la torta de zanahoria.



Anexo 3.

Liofilización al vacío de la torta residual de zanahoria.



Anexo 4.

Muestra liofilizada



FUENTES DE INFORMACIÓN

- Abbas, M., Saeed, F., Anjum, F. M., Afzaal, M., Tufail, T., Bashir, M. S., Ishtiaq, A., Hussain, S. y Suleria, H. A. R. (2016). Polifenoles naturales: una visión general. *International Journal of Food Properties*, 20(8), 1689–1699. Doi: 10.1080/10942912.2016.1220393
- Abderrahim, F., Huanatico, E., Segura, R., Arribas, S., Gonzalez, M. C., Condezo-Hoyos, L. (2015). Características físicas, compuestos fenólicos, betalaínas y capacidad antioxidante total de semillas de quinua coloreada (*Chenopodium quinoa* Willd.) del altiplano Peruano. *Food Chemistry* 183, 83-90. Doi: 10.1016/j.foodchem.2015.03.029
- Aguirre-Joya, J. A., Chacón-Garza, L. E., Valdivia-Najár, G., Arredondo-Valdés, R., Castro-López, C., Ventura-Sobrevilla, J. M., Aguilar-González, C. N. y Boone-Villa, D. (2020). Nanosistemas de pigmentos de origen vegetal y su relación con el estrés oxidativo. *Food and Chemical Toxicology*, 143. Doi: 10.1016/j.fct.2020.111433
- Amin, S., Jung, S., Kang, I., y Duval, A. (2021). Valorización de residuos de procesamiento de zanahorias baby. *Journal of Culinary Science & Technology*, 1–17. Doi: 10.1080/15428052.2021.1879338
- Araújo-Rodrigues, H., Santos, D., Campos, D. A., Ratinho, M., Rodrigues, I. M., Pintado, M. E. (2021). Desarrollo de pulpas y polvos congelados a partir de subproductos de zanahoria y tomate: impacto del tiempo de procesamiento y almacenamiento en las propiedades bioactivas y biológicas. *Horticulturae*, 7, 185. Doi: 10.3390/horticulturae7070185
- Arscott, S. A., y Tanumihardjo, S. A. (2010). Las zanahorias de muchos colores brindan nutrición básica y fitoquímicos biodisponibles que actúan como un

alimento funcional. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(2), 223–239.

Best, I., Casimiro-Gonzales, S., Portugal, A., Olivera-Montenegro, L., Aguilar, L., Muñoz, A. M., Ramos-Escudero, F. (2020). Cribado fitoquímico y actividad eliminadora de radicales DPPH de tres morfotipos de *Mauritia flexuosa* L.f. de Perú, y la estabilidad térmica de una bebida a base de leche enriquecida con carotenoides de estas frutas. *Heliyon*, 6, 10, e05209. Doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05209

Bhatta, S., Stevanovic, J. T. y Ratti, C. (2020). Liofilización de alimentos de origen vegetal.

Boeing, J. S., Barizão, E. O., E Silva, B. C., Montanher, P. F., de Cinque Almeida, V., Visentainer, J. V. (2014). Evaluación del efecto del solvente en la extracción de compuestos fenólicos y capacidades antioxidantes de las bayas: aplicación del análisis de componentes principales. *Chemistry Central journal*, 8(1), 48. Doi: 10.1186/s13065-014-0048-1

Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., Berset, C. (1995). Uso de un método de radicales libres para evaluar la actividad antioxidante. *LWT-Food Science and Technology*, 28(1), 25-30. Doi: 10.1016/S0023-6438(95)80008-5

Camelo, A.F.L.; Gómez, P.A. (2004). Comparación de índices de color para la maduración del tomate. *Horticultura Brasileira*, 22, 534-537. Doi: 10.1590/S0102-05362004000300006

Carrillo, C., Nieto, G., Martínez-Zamora, L., Ros, G., Kamiloglu, S., Munekata, P. E., Pateiro, M., Lorenzo, J. M., Fernández-López, J., Viuda-Martos, M., Pérez-Alvarez, J. A. y Barba, F. J. (2022). Enfoques novedosos para la

- recuperación de pigmentos naturales con efectos potenciales para la salud. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. Doi: 10.1021/acs.jafc.1c07208
- Cassani, L., Marcovich, N. E. y Gomez-Zavaglia, A. (2022). Valorización de residuos agrícolas de frutas y hortalizas para la producción sostenible de colorantes a base de carotenoides con mayor biodisponibilidad. *Food Research International*, 152. Doi: 10.1016/j.foodres.2021.110924
- Claussen, I. C., Ustad, T. S., Strommen, I., y Walde, P. M. (2007). Secado por congelación atmosférica: una revisión. *Drying Technology*, 25(6), 947–957. Doi: 10.1080/07373930701394845
- De Ancos, B., Sánchez-Moreno, C., Zacarías, L., Rodrigo, M. J., Sáyago Ayerdí, S., Blancas Benítez, F. J., Domínguez Avila, J. A., González-Aguilar, G. A. (2018). Efectos de dos métodos de secado diferentes (lío-filización y secado con aire caliente) sobre el perfil fenólico y carotenoide de subproductos de mango ‘Ataulfo’ . *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12, 2145-2157. Doi: 10.1007/s11694-018-9830-4
- De Araújo, F. F., de Paulo Farias, D., Neri-Numa, I. A., y Pastore, G. M. (2020). Polifenoles y sus aplicaciones: Una aproximación en química de alimentos y potencial de innovación. *Food Chemistry*, 338, 127535. Doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127535
- De Dios-Avila, N., Tirado-Gallegos, J. M., Rios-Velasco, C., Luna-Esquivel, G., Isiordia-Aquino, N., Zamudio-Flores, P. B., Estrada-Virgen, M. O., Cambero-Campos, O. J. (2022). Propiedades fisicoquímicas, estructurales, térmicas y reológicas de harina y almidón aislado de semillas de aguacate de las variedades Criolla y Hass. *Molecules*, 27(3), 910. Doi: 10.3390/molecules27030910

- De Groot, A. C. y Schmidt, E.(2016). Aceites Esenciales: Alergia de Contacto y Composición Química. CRC Press.
- Durmus, D. (2020). Límites del espacio de color CIELAB bajo espectros teóricos y 99 muestras de color de prueba. *Color Research y Application*, 1-7. Doi: 10.1002/col.22521
- El-Sawi, S. A., Ibrahim, M. E., Sleem, A. A., Farghaly, A. A., Awad, G. E. A., y Merghany, R. M. (2021). Desarrollo de fuentes medicinales alternativas a partir de residuos de uchuva, plátano y zanahoria como agentes antioxidantes, citotóxicos y antimicrobianos. *Acta Ecologica Sinica*. Doi: 10.1016/j.chnaes.2021.04.006
- Encalada, A.M.I., Perez, C.D., Flores, S.K., Rossetti, L., Fissore, E.N., Rojas, A.M. (2019). Fracciones enriquecidas con pectina antioxidante obtenidas a partir de zanahorias desechadas (*Daucus carota* L.) mediante extracción asistida por enzimas ultrasónicas. *Food Chem.* 289, 453–460. Doi: 10.1016/j.foodchem.2019.03.078
- Ergun, M. y Süslüoğlu, Z. (2018). Evaluación de la zanahoria como alimento funcional. *The Middle East Journal of Science*, 4(2), 113-119. Doi: 10.23884/mejs.2018.4.2.07
- Foods, 9(87). Doi: 10.3390/foods9010087
- Ghosh, S., Sarkar, T., Das, A. y Chakraborty, R. (2022). Colorantes naturales a partir de pigmentos vegetales y su encapsulación: una ventana emergente para la industria alimentaria. *Food Science and Technology*, 153:1-12.
- Gonzalvez, A.G., Martin, D., Slowing, K., Gonzalez Ureña, A. (2014). Información sobre la distribución de β -caroteno en raíces de zanahoria. *Foodstructure*, 2:61–65.

- Grzebelus D., Baranski R., Spalik K., Allender C., Simon P.W. (2011). *Daucus*. En: Kole C. (eds) *Parientes silvestres de cultivos: recursos genómicos y de mejoramiento*. Springer, Berlin, Heidelberg. Doi: 10.1007/978-3-642-20450-0_7
- Gupta, K., Talwar, G., Jain, V., Dhawan, K., y Jain, S. (2003). Cultivos de ensalada: cultivos de raíces, bulbos y tubérculos. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, 5060–5073. Doi: 10.1016/B0-12-227055-X/01040-3
- Hadley, P., y Fordham, R. (2003). Verduras de clima templado: Zanahoria, Chirivía y Remolacha. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, 5941–5945. Doi: 10.1016/B0-12-227055-X/01238-4
- Haseley, P. y Oetjen, G. W. (2018). *Freeze-Drying*. Wiley-VCH.
- Itle, R. A., Kabelka, E. A. (2009). Correlación entre los valores del espacio de color $L^*a^*b^*$ y el contenido de carotenoides en calabazas y calabazas (*Cucurbita* spp.). *HortScience*, 44(3), 633-637.
- Janiszewska-Turak, E. (2017). Microencapsulación de carotenoides por método de secado por aspersión y micronización supercrítica. *Food Research International*, 99, 891-901. Doi: 10.1016/j.foodres.2017.02.001
- Koca Bozalan, N., & Karadeniz, F. (2011). Perfil de carotenoides, contenido fenólico total y actividad antioxidante de las zanahorias. *International Journal of Food Properties*, 14(5), 1060–1068. Doi: 10.1080/10942910903580918
- Kopsell, D. A., y Kopsell, D. E. (2006). Acumulación y biodisponibilidad de carotenoides dietéticos en cultivos de hortalizas. *Trends in Plant Science*, 11(10), 499–507. Doi: 10.1016/j.tplants.2006.08.006

- Kuczynska, P., Jemiola-Rzeminska, M., Strzalka, K. (2015). Pigmentos fotosintéticos en diatomeas. *Marine Drugs*, 13, 5847-5881. Doi: 10.3390/md13095847
- Lichtenthaler, H. K., Buschmann C. (2001). Clorofilas y carotenoides: Medida y caracterización por espectroscopia UV-VIS. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry* F431-F438.
- Liu, Y., Zhang, Z., y Hu, L. (2021). Tecnología de liofilización de alta eficiencia en la industria alimentaria. *Reseñas Críticas en Ciencia de los Alimentos y Nutrición*, 1–19. Doi: 10.1080/10408398.2020.1865261
- Lopez-Quiroga, E., Antelo, L. T. y Alonso, A. A. (2012). Modelado a escala temporal y control óptimo de la liofilización. *Journal of Food Engineering*, 111(4), 655–666. Doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.03.001
- Ly, B. K., Dyer, E. B., Feig, J. L., Chien, A. L. y Del Bino, S. (2019). Técnicas de investigación simplificadas: colorimetría cutánea: una técnica confiable para la medición objetiva del color de la piel. *Journal of Investigative Dermatology*, 140, 3-12. Doi:10.1016/j.jid.2019.11.003
- Macura, R., Michalczk, M., Fiutak, G. y Maciejaszek, I. (2019). Efecto de la liofilización y el secado al aire sobre el contenido de carotenoides y antocianinas en zanahoria morada almacenada. *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.*, 18(2), 135–142. Doi: 10.17306/ J.AFS.2019.0637
- Madruga, M. S., de Albuquerque, M.F.S., Alves, S.I.R., do Amaral, S.D., Magnani, M., Neto, V.Q. Propiedades químicas, morfológicas y funcionales del almidón de semillas de jaca brasileña (*Artocarpus heterophyllus* L.). *Food Chemistry*, 143, 440-445. Doi: 10.1016/j.foodchem.2013.08.003

- Mapelli-Brahm, P. y Meléndez, Martínez, A. J. (2021). Los carotenoides incoloros fitoeno y fitoflueno: fuentes, consumo, biodisponibilidad y efectos sobre la salud. *Food Science*, 41:201-209.
- Meléndez-Martínez, A. J., Stinco, C. M. y Mapelli-Brahm, P. (2019). Carotenoides de la piel en la salud pública y la nutricosmética: funciones y aplicaciones emergentes de los carotenoides incoloros que absorben la radiación ultravioleta, el fitoeno y el fitoflueno; *Nutrients*, 11, 1-39. Doi: 10.3390/nu11051093
- Mohammed, A. y Abdullah, A. (2018). Microscopía electrónica de barrido (sem): una revisión. *Actas de la Conferencia Internacional de Hidráulica y Neumática de 2018 – HERVEX*. 77-85.
- Montenegro-Landívar, M. F., Tapia-Quirós, P., Vecino, X., Reig, M., Valderrama, C., Granados, M., Cortina, J. L. y Saurina, J. (2021). Polifenoles y su papel potencial para combatir enfermedades virales: una descripción general. *Science of the Total Environment*, 801, 149719. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149719
- Nireesha, G. R., Divya, L., Sowmya, C., Venkateshan, N., Niranjana, B. M. y Lavakumar, V. (2013). Liofilización/Secado por congelación: una revisión. *International Journal of Novel Trends in Pharmaceutical Sciences*, 3(4), 87-98.
- Pandey, K. B., y Rizvi, S. I. (2009). Polifenoles vegetales como antioxidantes dietéticos en la salud y las enfermedades humanas. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2(5), 270–278. Doi: 10.4161/oxim.2.5.9498
- Pant, B., y Manandhar, S. (2010). Propagación In Vitro de Zanahoria (*Daucus Carota* L.). *Scientific World*, 5(5), 54-53. Doi: 10.3126/sw.v5i5.2656

- Papoutsis, K. y Edelenbos, M. (2021). Pretratamientos poscosecha amigables con el medio ambiente y el ser humano para minimizar el desperdicio de zanahoria en la cadena de suministro causado por trastornos fisiológicos y hongos. *Food Science & Technology*, 112: 88-98.
- Pisoschi, A. M., Pop, A., Iordache, F., Stanca, L., Predoi, G., y Serban, A. I. (2020). Mitigación del estrés oxidativo por antioxidantes: una descripción general de su química e influencias en el estado de salud. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 112891. Doi: 10.1016/j.ejmech.2020.112891
- Raees, U. H. y Prasad, K. (2015). Aspectos nutricionales y de procesamiento de la zanahoria (*Daucus carota*). *South Asian J. Food Technol. Environ*, 1(1), 1-14.
- Rajkumar, G., Shanmugam, S., Galvão, M. de S., Leite Neta, M. T. S., Dutra Sandes, R. D., Mujumdar, A. S., y Narain, N. (2016). Evaluación comparativa de propiedades físicas y perfil de aroma de rodajas de zanahoria sometidas a aire caliente y liofilización. *Tecnología de secado*, 35(6), 699–708. Doi: 10.1080/07373937.2016.1206925
- Ramírez, J. A., Castañón-Rodríguez, J. F., Uresti-Marín, R. M. (2021). Un estudio exploratorio de los posibles riesgos de desperdicio de alimentos en las secciones de frutas y verduras de los supermercados. *Food Science and Technology*, Campinas, 41(4), 967-973. Doi: 10.1590/fst.27320
- Ribeiro, J. S. y Veloso, C. M. (2021). Microencapsulación de colorantes naturales con biopolímeros para aplicación en alimentos: Una revisión. *Food Hydrocolloids*, 112, 1-14. Doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.106374
- Rifqi, M., Setiasih, I. S. y Cahayana, Y. (2019). Resultado de la encapsulación de β -caroteno total de β -caroteno en polvo de zanahoria (*Daucus Carota L.*).

- Conferencia Internacional sobre Alimentos y Bioindustria, 443, 1-6. Doi: 10.1088/1755-1315/443/1/012063
- Santos-Sánchez, N. F., Salas-Coronado, R., Villanueva-Cañongo, C. y Hernández-Carlos, B. (2019). Compuestos antioxidantes y su mecanismo antioxidante. En E. Shalaby (Ed.), *Antioxidantes*, 5, IntechOpen.
- Šeregelj, V., Vulić, J., Četković, G., Čanadanovć-Brunet, J., Tumbas Šaponjac, V., Stajčić, S. (2020). Compuestos bioactivos naturales en desechos de zanahoria para aplicaciones alimentarias y beneficios para la salud. En Attatur-Rahman (edit.) *Estudios en química de productos naturales*, Elsevier. Doi: 10.1016/B978-0-12-819483-6.00009-6
- Shahidi, F., y Ambigaipalan, P. (2015). Fenólicos y polifenoles en alimentos, bebidas y especias: actividad antioxidante y efectos sobre la salud: una revisión. *Journal of Functional Foods*, 18, 820–897. Doi: 10.1016/j.jff.2015.06.018
- Sharma, K. D., Karki, S., Thakur, N. S., y Attri, S. (2011). Composición química, propiedades funcionales y procesamiento de la zanahoria: una revisión. *Journal of Food Science and Technology*, 49(1), 22–32. Doi: 10.1007/s13197-011-0310-7
- Sharma, M., Usmani, Z., Gupta, V. K., y Bhat, R. (2021). Valorización de residuos y subproductos hortofrutícolas para producir pigmentos naturales. *Reseñas Críticas en Biotecnología*, 41(4), 535–563. Doi: 10.1080/07388551.2021.1873240
- Shyamala, B. N., Jamuna, P. (2010). Contenido nutricional y propiedades antioxidantes de los desechos de pulpa de *Daucus carota* y *Beta vulgaris*. *Nutrition Society of Malaysia*, 16(3), 397-408.

- Siebert, T., Zuber, M., Hamann, E., Baumbach, T., Karbstein, H. P., y Gaukel, V. (2019). Micro-CT visualización del desarrollo de la estructura durante los procesos de liofilización. *Drying Technology*, 1–9. Doi:10.1080/07373937.2019.1572619
- Silva-Dias, J.C. (2014). Beneficios nutricionales y para la salud de las zanahorias y sus extractos de semillas. *Food and Nutrition Sciences*, 5: 2147-2156. Doi: 10.4236/fns.2014.522227
- Simon, P.W. y Goldman, I.L. (2007). Zanahoria. En: Singh, R. J. Serie de recursos genéticos, ingeniería cromosómica y mejoramiento de cultivos, Volume 3. Boca Raton: CRC Press, 497-517.
- Solovchenko, A., Yahia, E. M., y Chen, C. (2019). Pigmentos. *Fisiología y Bioquímica Poscosecha de Frutas y Hortalizas*. 225–252. Doi: 10.1016/b978-0-12-813278-4.00011-7
- Surbhi, S., Verma, R. C., Deepak, R., Jain, H. K. y Yadav, K. K. (2018). Una revisión: Alimento, composición química y aprovechamiento del orujo de zanahoria (*Daucus carota* L.). *International Journal of Chemical Studies*, 6(3), 2921-2926.
- Suwannarak, J. y Phanumong, P. (2021). Preparación y algunas propiedades fisicoquímicas del tallado de vegetales liofilizados. *Food Research*, 5 (6), 290 – 299. Doi: 10.26656/fr.2017.5(6).755
- Swapnil, P., Meena, M., Singh, S. K., Dhuldhaj, U. P., Harish, y Marwal, A. (2021). Papeles vitales de los carotenoides en plantas y humanos para deteriorar el estrés con su estructura, biosíntesis, ingeniería metabólica y aspectos funcionales. *Current Plant Biology*, 26, 1-11. Doi: 10.1016/j.cpb.2021.100203

- Tapiero, H., Townsend, D.M., y Tew, K.D. (2004). El papel de los carotenoides en la prevención de patologías humanas. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 58:100–110.
- Tiwari, S., Upadhyay, N., Singh, A. K., Meena, G. S., Arora, S. (2019). Extracción sin disolventes orgánicos de carotenoides a partir de biorresiduos de zanahoria y sus propiedades fisicoquímicas. *Journal of food science and technology*, 56(10), 4678-4687. Doi: 10.1007/s13197-019-03920-5
- Upadhyay, A., Sharma, H. K., Sarkar, B. C. 2008. Caracterización y cinética de deshidratación del orujo de zanahoria. *Agric. Eng. Int. CIGR J.* 10, 1–9
- Vénica, C. I., Spotti, M. J., Pavón, Y. L., Molli, J. S., Perotti, M. C. (2020). Influencia de la adición de polvo de fibra de zanahoria en las características reológicas, microestructurales y sensoriales del yogur tipo batido. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(5), 1916-1923. Doi: 10.1111/ijfs.14415
- Yadav, P. (2020). Una revisión sobre los diferentes tipos de zanahoria y sus composiciones químicas. *Journal of Pharmacy*, 10(5), 32-39.
- Ye, Q., Wu, Y. H., Gao, Y., Li, Z.H., Gu, W.J. y Zhang, C.G. (2019). Un estudio histológico de tejidos de ratón y pérdida de agua después de la liofilización. *Biotechnic and Histochemistry*. Doi: 10.1080/10520295.2019.1695945
- Yildiz, G. (2021). Color, microestructura, propiedades fisicoquímicas, texturales y sensoriales con la retención de metabolitos secundarios en rodajas de zanahoria (*Daucus carota* L.) liofilizadas, por convección y por microondas. *British Food Journal*. Doi: 10.1108/BFJ-03-2021-0308
- Zhou, W., Apkarian, R., Wang, Z. L., y Joy, D. (2006). Fundamentos de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Scanning Microscopy for Nanotechnology*, 1–40. Doi: 10.1007/978-0-387-39620-0_1

