



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
Unidad Profesional Interdisciplinaria de
Ingeniería Campus Zacatecas



**“Producción de polvo de piña mediante el secado
por espuma (Foam-Mat Drying): Efecto de la
concentración de proteína-almidón en las
propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales”**

TESIS INDIVIDUAL

Que para obtener el título de ingeniería en Alimentos

Presenta:

Omar Ibarra de los Santos

Directores de tesis:

I. I. A. Juan Armando Chávez Rosales

Dr. en C. A. Juan José Figueroa González

Zacatecas, Zac., diciembre 2023



Folio
UPIIZ/ESA/592/2023

Asunto
DESIGNACIÓN DIRECCIÓN TESIS
C. OMAR IBARRA DE LOS SANTOS
ING. EN ALIMENTOS
BOLETA: 2020670027
GENERACIÓN: 2019-2023

2023. Año de Francisco Villa
30 Aniversario de la Declaración sobre
la Eliminación de la Violencia contra la Mujer (ONU)
60 Aniversario del CECyT 7 "Cuauhtémoc" y del CENAC
90 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil
40 Aniversario del CIIDIR, Unidad Oaxaca

Zacatecas, Zac., a 29 de noviembre de 2023

C. OMAR IBARRA DE LOS SANTOS
PRESENTE

Mediante el presente se hace de su conocimiento que este Departamento acepta que el I.I.A. Juan Armando Chávez Rosales, sea su DIRECTOR INTERNO, en el tema que propone usted a desarrollar como prueba escrita de la opción de titulación por Tesis Individual, con el título y contenido siguiente:

"Producción de polvo de piña mediante el secado por espuma (Foam-Mat-Drying): Efecto de la concentración de proteína-almidón en las propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales".

- I.- INTRODUCCIÓN
- II.- REVISIÓN DE LA LITERATURA
- III.- JUSTIFICACIÓN
- IV.- HIPÓTESIS
- V.- OBJETIVOS
- VI.- METODOLOGÍA
- VII.- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- VIII.- CONCLUSIONES
- IX.- RECOMENDACIONES
- X.- LITERATURA CITADA
- XI.- ANEXOS

Se concede un plazo de máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el jurado asignado.


M. en C. Fátima Sánchez Álvarez
Presidenta de la Academia de Bioingeniería


I.I.A. Juan Armando Chávez Rosales
Director de Tesis
Ced. Profesional: 097177741


L.C. MARÍA MONSERRATH SÁNCHEZ CAMARERO
Jefa del Departamento de Evaluación y Seguimiento Académico


MCC. Roberto Oswaldo Cruz Leija
Subdirector Académico Interino
de la UPIIZ





Folio
UPIIZ/ESA/593/2023

Asunto
DESIGNACIÓN CODIRECCIÓN TESIS
C. OMAR IBARRA DE LOS SANTOS
ING. EN ALIMENTOS
BOLETA: 2020670027
GENERACIÓN: 2019-2023

2023. Año de Francisco Villa
30 Aniversario de la Declaración sobre
la Eliminación de la Violencia contra la Mujer (ONU)
60 Aniversario del CECyT 7 "Cuauhtémoc" y del CENAC
90 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil
40 Aniversario del CIIDIR, Unidad Oaxaca

Zacatecas, Zac., a 29 de noviembre de 2023

C. OMAR IBARRA DE LOS SANTOS
PRESENTE

Mediante el presente se hace de su conocimiento que este Departamento acepta que el Dr. en C. Juan José Figueroa González, sea su CODIRECTOR EXTERNO, en el tema que propone usted a desarrollar como prueba escrita de la opción de titulación por Tesis Individual, con el título y contenido siguiente:

"Producción de polvo de piña mediante el secado por espuma (Foam-Mat-Drying): Efecto de la concentración de proteína-almidón en las propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales".

- I.- INTRODUCCIÓN
- II.- REVISIÓN DE LA LITERATURA
- III.- JUSTIFICACIÓN
- IV.- HIPÓTESIS
- V.- OBJETIVOS
- VI.- METODOLOGÍA
- VII.- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- VIII.- CONCLUSIONES
- IX.- RECOMENDACIONES
- X.- LITERATURA CITADA
- XI.- ANEXOS

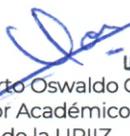
Se concede un plazo de máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el jurado asignado.


M. en C. Fátima Sánchez Álvarez
Presidenta de la Academia de Bioingeniería


Dr. en C. Juan José Figueroa González
Codirector de Tesis
Ced. Profesional: 012978880


L.C. MARÍA MONSERRAT SALDANAÑO BELTRÁN
Jefa del Departamento de Evaluación Académico y Seguimiento Académico

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
DE INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS


MCC. Roberto Oswaldo Cruz Leija
Subdirector Académico Interoctiva
de la UPIIZ



2023
Año de
Francisco
VILLA



Folio
UPIIZ/ESA/623/2023

ASUNTO
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS INDIVIDUAL

C. OMAR IBARRA DE LOS SANTOS
INGENIERÍA EN ALIMENTOS
BOLETA: 2020670027
GENERACIÓN: 2019-2023
PRESENTE

2023. Año de Francisco Villa
30 Aniversario de la Declaración sobre
la Eliminación de la Violencia contra la Mujer (ONU)
60 Aniversario del CECyT 7 "Cauhtémoc" y del CENAC
90 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil
40 Aniversario del CIIDIR, Unidad Oaxaca

Zacatecas, Zac., a 12 de diciembre de 2023

Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la tesis individual que presenta con fines de titulación denominada:

"Producción de polvo de piña mediante el secado por espuma (Foam-Mat Drying): Efecto en la concentración de proteína-almidón en las propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales".

Encontramos que el citado Trabajo de *Tesis Individual*, reúne los requisitos para autorizar la impresión y proceder a la presentación del Examen Profesional debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se hicieron.

DRA. KAROL KARLA GARCÍA AGUIRRE

I.A. JUAN ARMANDO CHÁVEZ ROSALES

M. EN C. SERGIO ZAVALA CASTILLO

DR. EN C. JUAN JOSÉ FIGUEROA GONZÁLEZ

DR. MIGUEL SERVIN PALESTINA

L.C. MARÍA MONSERRAT SALDANA NORIEGA
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN
Y SEGUIMIENTO ACADÉMICO



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
DE INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS



Autorización de uso de obra
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Presente

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe **Omar Ibarra de los Santos**, estudiante del programa de Ingeniería en alimentos, con número de boleta 2020670027, adscrito a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas; manifiesto ser autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada **“Producción de polvo de piña mediante el secado por espuma (Foam-Mat Drying): Efecto de la concentración de proteína-almidón en las propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales”**, en adelante **“La Tesis”** y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el Artículo 27 Fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo al Instituto Politécnico Nacional, en adelante el **“IPN”**, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales **“La Tesis”** por un periodo indefinido contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso al **“IPN”** de su terminación.

En virtud de lo anterior, el **“IPN”** deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de **“La Tesis”**.

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de **“La Tesis”**, manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene a ninguna otra otorgada por el suscrito respecto de **“La Tesis”**, por lo que deslindo de toda responsabilidad al **“IPN”** en caso de que el contenido de **“La Tesis”** o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Zacatecas, Zac., a 13 de diciembre del 2023

Atentamente



Omar Ibarra de los Santos

Agradecimientos

Agradezco al dios en el que creo a mi manera, porque entre los vaivenes de su designio divino y mi albedrío, pude (o me permitió) llegar a donde me encuentro.

A mis padres Ma. Del Rosario de los Santos Santana y Omar Ibarra Jaramillo, por brindarme las oportunidades que ellos hubiesen querido aprovechar y porque no fue fácil convivir conmigo. Esto es para ustedes que siempre me han inculcado, dado y deseado lo mejor.

A mi hermana Jimena Ibarra, por ser la alegría de la casa, por su cariño incondicional a pesar de mi mal carácter y por amenizar las situaciones amargas de la vida cotidiana.

A María de la Luz, por sacarme de apuros, brindarme su apoyo y consejos para no perder el buen camino.

A María Casillas Moreira, porque su historia de vida impactó en mi personalidad y en mi percepción de lo que vale la pena valorar.

A mis directores de tesis el I. I. A. Juan Armando Chávez Rosales y el Dr. en C. A. Juan José Figueroa González, que con toda la humildad y paciencia coordinaron mis esfuerzos para poder presentar este trabajo.

A mis revisores, la Dr. C. Karol Karla Aguirre García, el M. en C. Sergio Zavala Castillo y el Dr. en I. A. Miguel Servin Palestina, pero también extendiendo este agradecimiento a mis profesores del C.E.B.A.A.R.E, CECyT18 y por supuesto la UPIIZ, porque yo soy el resultado de todos esos regaños, correcciones y consejos, gracias por dedicarme su tiempo y por impregnar pasión al conocimiento que transmiten.

A Pam, por acompañarme y animarme cada vez que necesite tomar aliento para no claudicar y por motivarme a no estancarme en ningún ámbito.

A los “Nepomucenos” por aceptarme entre sus filas y brindarme su deleitosa compañía.

Y a todas las amistades que he encontrado en el camino, ustedes saben quiénes son, porque mi rostro me delata cada que los veo, sepan que los quiero y que les deseo lo mejor en la vida.

Dedicatoria

Leticia, en honor a tu recuerdo quiero ser un hombre de bien.

Resumen

La piña es una de las frutas más importantes a nivel mundial, por lo que es una fuente de ingresos para los productores y también, se convierte en un desperdicio alimentario. El objetivo de este trabajo fue producir polvo de piña mediante el secado por espuma (Foam-Mat Drying) y evaluar el efecto de la concentración proteína-almidón en las propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales. La relación de humedad del deshidratado de piña mediante Foam-Mat Drying se ajustó a diferentes modelos matemáticos y se evaluaron las propiedades fisicoquímicas (color, índice de pardeamiento, acidez titulable, pH, sólidos solubles totales, contenido de antocianinas totales) y tecnofuncionales (índice de absorción de agua, índice de solubilidad, índice de hinchamiento, densidad aparente y compactada) en los diferentes polvos de piña. Las curvas de secado tuvieron un mejor ajuste en los modelos matemáticos de Newton, Page, Logarítmico y Hendersón y Pabis, destacando este último como el mayor eficiencia de coorelación (0.883 a 0.997 EFF). Los factores proteína-almidón en las formulaciones de Foam-Mat Drying presentaron diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) en las variables de respuesta. Por ejemplo, los sólidos soluble totales reportaron de 3.3 a 5.25 °Brix, acidez titulable total de 2.39 a 3.10 % ácido cítrico, capacidad de hinchamiento de 6.75 a 7.53 g de H₂O/g de muestra y antocianinas totales de 94.21 a 146.06 mg/g. La obtención de polvos de pulpa de piña madura mediante Foam-Mat Drying y con diferentes concentraciones de proteína y almidón influyen en las propiedades tecnofuncionales de estos polvos.

Palabras Clave: Piña, Foam-Mat Drying, polvos de fruta, proteína de guisante, almidón de tapioca, modelos matemáticos, propiedades fisicoquímicas, propiedades tecnofuncionales.

Abstract

Pineapple is one of the most important fruits worldwide, so it is a source of income for producers and also, it becomes a food waste. The objective of this work was to produce pineapple powder by Foam-Mat Drying and to evaluate the effect of protein-starch concentration on physicochemical and techno-functional properties. The moisture ratio of pineapple dehydrate by Foam-Mat Drying was adjusted to different mathematical models and the physicochemical (color, browning index, titratable acidity, pH, total soluble solids, total anthocyanin content) and techno-functional (water absorption index, solubility index, swelling index, bulk and compacted density) properties were evaluated in the different pineapple powders. The drying curves had a better fit in the Newton, Page, Logarithmic and Henderson and Pabis mathematical models, the latter standing out as the highest correlation efficiency (0.883 to 0.997 EFF). The protein-starch factors in the Foam-Mat Drying formulations presented significant statistical differences ($p > 0.05$) in the response variables. For example, total soluble solids reported from 3.3 to 5.25 °Brix, total titratable acidity from 2.39 to 3.10 % citric acid, swelling capacity from 6.75 to 7.53 g H₂O/g sample and total anthocyanins from 94.21 to 146.06 mg/g. Obtaining ripe pineapple pulp powders by Foam-Mat Drying and with different concentrations of protein and starch influence the techno-functional properties of these powders.

Keywords: Pineapple, Foam-Mat Drying, fruit powders, pea protein, tapioca starch, mathematical models, physicochemical properties, techno-functional properties.

I. Índice de contenido

| | |
|--|----|
| Agradecimientos..... | 1 |
| Resumen..... | 2 |
| Abstract..... | 3 |
| I. Índice de contenido..... | 4 |
| II. Índice de tablas..... | 7 |
| III. Índice de figuras..... | 8 |
| Acrónimos..... | 9 |
| Simbología..... | 9 |
| 1. Introducción..... | 10 |
| 2. Revisión de literatura..... | 12 |
| 2.1 Desperdicios alimentarios a nivel mundial y nacional..... | 12 |
| 2.2 Desperdicios alimentarios en mercados o tiendas de conveniencia..... | 13 |
| 2.3 Consumo <i>per cápita</i> y desperdicio de piña..... | 14 |
| 2.3.1 Valor nutricional de la piña..... | 15 |
| 2.3.2 Valor funcional o nutracéutico de la piña..... | 16 |
| 2.4 Deshidratado o secado de alimentos..... | 17 |
| 2.4.1 Métodos de deshidratación o secado de los alimentos..... | 20 |
| 2.4.1.1 Secado natural (solar)..... | 21 |
| 2.4.1.2 Secado por aire caliente (en horno)..... | 21 |
| 2.4.1.3 Osmodeshidratación o deshidratación osmótica..... | 22 |
| 2.4.1.4 Prensado y centrifugación..... | 22 |
| 2.4.1.5 Deshidratado con microondas..... | 22 |
| 2.4.1.6 Liofilización..... | 23 |
| 2.4.2 Técnica de secado por tapete de espuma (Foam–Mat Drying)..... | 23 |

| | |
|---|----|
| 2.4.3 Cinética de secado de los alimentos | 24 |
| 2.5 Propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales en polvos de frutos deshidratados | 25 |
| 2.5.1 Capacidad de absorción de agua..... | 27 |
| 2.5.2 Índice de Solubilidad | 27 |
| 2.5.3 Capacidad de hinchamiento | 27 |
| 2.5.4 Densidad | 28 |
| 2.5.5 Acides titulable y pH..... | 29 |
| 2.5.6 Índice de pardeamiento..... | 30 |
| 2.5.7 Valor nutricional en polvos de frutos deshidratados | 30 |
| 2.5.8 Valor funcional o nutracéutico en polvos de frutos deshidratados | 31 |
| 3. Justificación..... | 32 |
| 4. Hipótesis..... | 33 |
| 5. Objetivos | 33 |
| 5.1 Objetivo general..... | 33 |
| 5.2 Objetivos específicos | 33 |
| 6. Metodología..... | 34 |
| 6.1 Preparación de la materia prima..... | 34 |
| 6.2 Tratamiento y preparación de espumas..... | 35 |
| 6.3 Análisis fisicoquímicos de los polvos de piña | 39 |
| 6.3.1 Sólidos solubles totales..... | 39 |
| 6.3.2 Acidez titulable | 39 |
| 6.3.3 pH..... | 40 |
| 6.3.4 Colorimetría de los polvos..... | 40 |
| 6.3.5 Índice de pardeamiento..... | 40 |

| | |
|--|----|
| 6.3.6 Capacidad de absorción de agua, índice de solubilidad y capacidad de hinchamiento..... | 40 |
| 6.3.7 Antocianinas totales | 41 |
| 6.3.8 Densidad de los polvos | 41 |
| 6.4 Análisis estadístico | 42 |
| 7. Análisis de resultados | 42 |
| 7.1 Estabilidad de la espuma en pulpa | 42 |
| 7.2 Modelado Matemático..... | 45 |
| 7.3 Sólidos solubles totales (° Brix) | 54 |
| 7.4 Acidez titulable total y pH..... | 56 |
| 7.5 Colorimetría | 59 |
| 7.6 Índice de pardeamiento en polvos | 62 |
| 7.7 Capacidad de absorción de agua, hinchamiento e índice de solubilidad en polvos | 64 |
| 7.8 Antocianinas totales..... | 67 |
| 7.9 Densidad de los polvos..... | 70 |
| 8. Conclusiones..... | 73 |
| 9. Recomendaciones..... | 74 |
| 10. Literatura citada..... | 75 |
| 11. Anexos | 96 |
| 11.1 Sólidos solubles totales (° Brix) | 96 |
| 11.2 Acidez titulable..... | 97 |
| 11.3 pH | 97 |
| 11.4 Colorimetría de la pulpa..... | 97 |
| 11.5 Antocianinas totales..... | 98 |

II. Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de la piña reportadas en unidades por 100 g de muestra (Ramírez y Delahaye, 2011; Ortega <i>et al.</i> , 2021, y Peralta 2020). | 16 |
| Tabla 2. Propiedades tecno-funcionales de las proteínas en los alimentos. Tomado de Herrera 2015. | 26 |
| Tabla 3. Valores de compresibilidad e índice de Hausner (Feum, 2016)..... | 29 |
| Tabla 4. Tratamientos de la pulpa para la elaboración de espumas..... | 36 |
| Tabla 5. Modelos de capa delgada para el cálculo de la razón de humedad. | 38 |
| Tabla 6. Valores promedio de la expansión de la espuma. | 44 |
| Tabla 7. Datos de la espuma Foam-Mat Drying (FM1), tratamiento control calibrados y evaluados a diferentes modelos matemáticos..... | 46 |
| Tabla 8. Datos de la espuma Foam-Mat Drying (FM2), calibrados y evaluados a diferentes modelos matemáticos..... | 48 |
| Tabla 9. Datos de la espuma Foam-Mat Drying (FM3), calibrados y evaluados a diferentes modelos matemáticos..... | 50 |
| Tabla 10. Datos de la espuma Foam-Mat Drying (FM4), calibrados y evaluados a diferentes modelos matemáticos..... | 52 |
| Tabla 11. Valores promedio de los sólidos solubles totales en los polvos..... | 56 |
| Tabla 12. Valores promedio del pH y la acidez titulable en la pulpa y los polvos. | 59 |
| Tabla 13. Valores promedio de las coordenadas L*, a* y b* determinadas en los polvos..... | 61 |
| Tabla 14. Valores promedio de la absorbancia (420 nm) medidas en los polvos. | 64 |
| Tabla 15. Valores promedio de los índices absorción de agua, solubilidad y capacidad de hinchamiento en los polvos..... | 67 |
| Tabla 16. Valores promedio la concentración de antocianinas (mg de cianidina 3-glucósido/10 g de muestra) de los polvos. | 69 |
| Tabla 17. Valores promedio de la densidad aparente y compactada y de los índices Carr y Haussner de los polvos. | 72 |

III. Índice de figuras

| | |
|---|-----|
| Figura 1. Ejemplo de la difusión y transferencia de masa y energía en los alimentos. Elaboración propia. | 18 |
| Figura 2. Piña parcialmente deshidratada y piña deshidratada. Imágenes tomadas de Kero-mart.com y Pinteres.es. | 18 |
| Figura 3. Piña madura a un 100% de color amarillo en la superficie del cuerpo de la fruta próxima a considerarse como desecho. | 35 |
| Figura 4. Razón de humedad (RH) de los datos de FM1 (tratamiento control) calibrados y evaluados en diferentes modelos matemáticos. | 47 |
| Figura 5. Razón de humedad (RH) de los datos de FM2 calibrados y evaluados en diferentes modelos matemáticos. | 49 |
| Figura 6. Razón de humedad (RH) de los datos de FM3 calibrados y evaluados en diferentes modelos matemáticos. | 51 |
| Figura 7. Razón de humedad (RH) de los datos de FM4 calibrados y evaluados en diferentes modelos matemáticos. | 53 |
| Figura 8. Espuma antes y después del secado. | 99 |
| Figura 9. Molienda manual de las hojuelas obtenidas del tapete de espuma. | 99 |
| Figura 10. Cambio de color en la titulación de pulpa. | 99 |
| Figura 11. Valores promedio de la acidez titulable en las pulpas y los polvos tratados. | 100 |
| Figura 12. Equipo de titulación Mettler Toledo. | 100 |
| Figura 13. Multiceldas en la placa del espectrofotómetro UV-Vis. | 101 |
| Figura 14. Tubos Falcon en agitación. | 101 |
| Figura 15. Centrifugación de los tubos Falcon. | 101 |
| Figura 16. Decantación en cajas Petri y posterior secado. | 102 |
| Figura 17. Agitación de los tubos Falcon. | 102 |
| Figura 18. Pulpa y espuma de piña. | 102 |
| Figura 19. Ensayo de estabilidad de espuma montado. | 103 |
| Figura 20. Separación de la fase acuosa de la espuma durante el experimento. | 103 |
| Figura 21. Ensayo de densidad y compactación de los polvos. | 104 |

Acrónimos

| | |
|-----|--------------------------|
| AT | Almidón de tapioca |
| ATT | Acidez Total Titulable |
| CMC | Carboximetilcelulosa |
| FM1 | Foam-mat 1 |
| FM2 | Foam-mat 2 |
| FM3 | Foam-mat 3 |
| FM4 | Foam-mat 4 |
| FMD | Foam-Mat Drying |
| MD | Maltodextrina |
| NMX | Norma Mexicana |
| PG | Proteína de guisante |
| SST | Sólidos Solubles Totales |
| RPM | Revoluciones por minuto |

Simbología

| | |
|-------|------------------------|
| % | Porcentaje |
| °Brix | Grados Brix |
| °C | Grados Celsius |
| µm | Micrómetro |
| cm | Centímetros |
| g | Gramos |
| h | Horas |
| mL | Mililitros |
| min | Minutos |
| P/V | Peso sobre volumen |
| pH | Potencial de hidrógeno |

1. Introducción

De acuerdo con el Banco de Alimentos de México, un tercio de la comida producida en el país es desaprovechado a lo largo de todos los puntos de la cadena alimentaria (PROFECO, 2022). La pérdida y desaprovechamiento de alimentos es un problema social, económico y ambiental, debido a que los alimentos que no son consumidos se convierten en desechos de manejo especial (Hernández *et al.*, 2020).

En los últimos años, la reducción de la oferta, la gran demanda mundial de importaciones de frutas tropicales y el considerable aumento de los precios mundiales de la energía e insumos, ha elevado los costos de producción de la piña. Si bien la producción de frutas tropicales no representa una gran parte del comercio agrícola mundial, es cierto que ha tenido un aumento destacable en su producción en la última década debido a su elevado valor unitario medio de exportación, lo cual las vuelve un ingreso valioso para los productores de estos frutos (FAO, 2023). El aguacate, el mango y la piña son las frutas tropicales que en mayor volumen son comercializadas, siendo México un productor modesto de esta última, manteniendo un promedio en los últimos 4 años de 60 mil toneladas, pero sufriendo un descenso de hasta el 50 % de su producción en el año 2022 debido a cambios climáticos (FAO, 2022).

En 2020 se produjeron 1,209,000 toneladas de piña en todo el país, lo cual posicionó a México como el noveno productor de este fruto a nivel mundial. (SADER, 2021). En México se puede producir este fruto durante todo el año, principalmente entre los meses de junio y agosto que son los de mayor rendimiento. Los principales estados productores de piña son Veracruz (64.9 %), Oaxaca (12.8 %), Tabasco (6.2 %), Nayarit (4.6 %) y Jalisco (2.8 %) (SIAP, 2020).

La piña (*Ananas comosus L.*) también conocida como ananá o ananás, es una monocotiledónea que pertenece a la familia *Bromeliaceae*. Proveniente de Sudamérica (quizá entre los territorios actualmente conocidos como Brasil y Paraguay) y se ha cultivado durante cientos de años a lo largo de América (en las regiones tropicales), tal es su impacto, que actualmente se encuentra en una gran variedad de presentaciones y productos alimenticios gracias a los minerales que

contiene como el fósforo, magnesio, calcio, hierro y sodio, y vitaminas como la A, C y ácido fólico (SIAP, 2017).

La piña es un fruto de forma ovalada y cáscara gruesa que por lo general mide 30 centímetros de largo y 15 de ancho. Su pulpa es carnosa y jugosa, y varía de color entre amarilla o blancuzca. Además, se encuentra cubierta por brácteas verdes, las cuales al madurar cambian de color a naranja y se endurecen para formar la piel de la fruta (SAGARPA, 2017). La planta puede llegar a crecer hasta unos 70 centímetros de altura, posee hojas verdosas y ensiformes, bordes espinosos que terminan en punta y flores moradas, su fruto es muy oloroso, succulento y está acompañado de un penacho de hojas (RAE, 2022).

Un ejemplo de deshecho o desperdicio alimentario es la piña, la cual puede perder su calidad fisicoquímica y nutricional en las tiendas de mercado, centrales de abasto o fruterías de pequeños comerciantes. La piña es una fruta que antes de ser considerada un desperdicio alimentario, puede ser utilizada para revalorizar su valor comercial e incrementar su valor agregado. Por lo tanto, los alimentos deshidratados en su presentación en polvo pueden ser una opción muy atractiva como producto comercial, esto gracias a la pérdida significativa que tienen de peso y de volumen por la pérdida de agua, lo cual reduce los costos de envasado, almacenamiento, transporte y desde luego, minimizando las pérdidas económicas (Marín, *et al.*, 2006).

La tecnología de secado mediante espumas (Foam-Mat) es una alternativa para el deshidratado de la pulpa de frutas debido a que permite conservar alimentos por grandes periodos de tiempo y brinda la posibilidad de consumirlo en lugares donde no se puede conseguir fresco el alimento. El secado mediante espumas es un método alternativo y relativamente sencillo que permite la eliminación de agua de jugos o purés tanto de frutas, como de verduras. Además, de que conserva las propiedades originales de la fruta; color, sabor, nutrientes y vitaminas, gracias al mínimo daño por calor que recibe el alimento (Zamora y Loredó, 2020).

2. Revisión de literatura

2.1 Desperdicios alimentarios a nivel mundial y nacional

En 2015 el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), hizo un llamado global para combatir la pobreza, la desigualdad, el cambio climático, la degradación ambiental, y promover la prosperidad, la paz y la justicia mediante la Agenda de Desarrollo Sostenible para 2030 y para lograrlo, estableció los 17 Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) (PNUD, 2020).

En cuestiones alimentarias es muy importante reducir al mínimo la pérdida y desperdicios de alimentos, ya que, el 13.8 % de los alimentos producidos se pierden desde la explotación agrícola, hasta el comercio al por menor y en el consumo público en los hogares, siendo las frutas y hortalizas los alimentos que más se pierden. Además, se estima que para el año 2050, la población mundial ascenderá aproximadamente a 10 000 millones de personas. La FAO creó el Índice de Pérdida de Alimentos (IPA) el cual se centra en los alimentos que son eliminados a lo largo de la cadena de suministro y de esta forma poder dar un seguimiento al objetivo de desarrollo sustentable número 12.3 (Producción y Consumo Responsable) (FAO, 2019).

El Índice de desperdicio de alimentos del Programa para las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) del 2021, informa que el desperdicio de alimentos en los hogares, los establecimientos minoristas y la industria de servicios alimentarios es de 931 millones de toneladas cada año, de los cuales 570 millones son producidos en los hogares. El 17 % de los alimentos se desperdicia en la venta al por menor y por los consumidores, con esa comida, se podría alimentar a 1 260 millones de personas que sufren de inseguridad alimentaria cada año (IDA, 2021). Por otro lado, los desechos de alimentos representan entre el 8 y 11 % de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, esto contribuye a que se tenga un clima inestable, lo cual afecta negativamente al rendimiento de las cosechas y reduce la calidad nutricional de los cultivos (FAO, 2022). De tal manera que, según el informe “El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo”, el número de personas afectadas por el hambre en el mundo aumentó

hasta 828 millones de personas en 2021, lo que implicó un crecimiento de 46 millones con respecto al 2020. Además, se estima que 3 100 millones de personas no tienen acceso a una dieta saludable (FAO, *et al.*, 2023).

El desperdicio de alimentos en México es de 94 kg/*per cápita* (Kemper, *et al.*, 2019). Cada año en México se pierde o desperdicia entre el 37 y 40 % de la producción de alimentos (30 millones de toneladas, desde el sector primario, hasta el consumidor) que equivalen a 490 mil millones de pesos. Con toda esa comida se podría alimentar por lo menos a la mitad de los 28 millones de personas en estado de carencia alimentaria y 10 millones con hambre crónica que existen en el país (BANMEX, 2023). Bajo este contexto, en julio del 2017, diversas instituciones nacionales como SAGARPA, SEMARNART, SHCP, entre otros. Solicitaron al banco mundial un informe para desarrollar una estrategia futura que ayude a disminuir las pérdidas y desperdicios de alimentos (PDA). El informe reveló que en México alrededor de 20 millones de toneladas de alimentos desperdiciadas al año provienen de 79 productos, los cuales representan el 81 % del total de los alimentos comprados por los hogares mexicanos. Esos 20 millones de toneladas de alimentos representan el 2.5 % del PIB nacional. Además, son responsables de 36 millones de toneladas de emisiones de gases de efecto invernadero, sin mencionar que los alimentos que no se consumen representan desperdicios de recursos; tierra, agua, energía, semillas e insumos empleados para su producción (Wrap, 2020).

2.2 Desperdicios alimentarios en mercados o tiendas de conveniencia

Las razones por las cuales se generan pérdidas alimentarias son muy variadas, desde la producción agrícola; mal clima, plagas, problemas de procesamiento, sobreproducción y mercados inestables. Hasta el punto de compra y consumo en tiendas y hogares; sobrecompra, mala planeación y confusión sobre las etiquetas (PROFECO, 2022).

En 2019 se estimó que se desperdiciaron 931 millones de toneladas, de las cuales el 61 % se debían a los hogares, el 26 % del servicio de alimentos y el 13 % del comercio minorista (supermercados o almacenes). Las razones por las que se

generan desperdicios en el hogar son variadas, pero las principales son las siguientes (PNUMA, 2022):

- Deterioro de alimentos.
- Preparación excesiva.
- Confusión en la etiqueta de la fecha.
- Compra excesiva.
- Mala planificación de la dieta.

Con respecto a este problema Miguel Fernando Garcían, presidente de la Confederación Nacional de Agrupaciones de Comerciantes en Centros de Abastos (CONACCA) expresó lo siguiente: “Las centrales de abastos y los comercios detallistas registran los mayores volúmenes de pérdidas de alimentos dentro de la cadena de suministro, hecho que confirma que nuestro papel debe ser protagónico en la reducción de la pérdida de alimentos” (Forbes, 2020).

2.3 Consumo *per cápita* y desperdicio de piña

Según datos de la página web estatista, en 2021 México presentó un consumo *per cápita* anual de 9.4 kilogramos de piña, siendo la quinta fruta más consumida ese año (Statista 2021).

En contraste a lo anterior, SADER mencionó que el consumo *per cápita* anual ese mismo año fue de 7.7 kilogramos, además que su participación en la producción nacional de frutos fue del 4.4 % (SADER, 2021).

En el año 2023 en México se sembraron 47,535.75 hectáreas de piña, de las cuales se cosecharon 24,942.5 toneladas y tuvo una participación del 5.3 % en la producción nacional de frutas (SIAP, 2023).

Los productores de piña enfrentan problemas para manejar los residuos generados posterior a la cosecha. Algunos optan por abandonar los rastrojos (tardan 13 meses en degradarse), pero debido al cultivo intensivo de la piña no es posible esperar a que se degraden antes de hacer una nueva siembra. Además, se corre el riesgo de

que se multipliquen insectos, lo que conlleve a la presencia de enfermedades en los residuos que afecten al entorno. Otra alternativa por la que optan los agricultores es quemar los residuos, pero esto disminuye la carga bacteriana y de hongos en los suelos. Pocos son los agricultores que buscan la forma de reintegrar ese material orgánico al suelo y convertirlo en una fuente de nutrientes que les permita ahorrar en fertilizante, como lo es el añadido de microorganismos descomponedores a los residuos triturados, para que posteriormente sean incorporados a la tierra (UCR, 2018).

Uno de los residuos que no cuenta con un tratamiento adecuado en México es la piña, a pesar de que es el tercer fruto tropical más importante del país (después del aguacate y el mango). Estos residuos son un problema económico y ambiental grande en el país, ya que tan solo durante el procesamiento de enlatados de esta fruta, el 59.4 % de cada piña es desechado (cáscara, corazón y corona), lo que genera 560 mil toneladas de residuos, de los cuales sólo el 30 % es utilizado como pienso para ganado. Por otro lado, el desperdicio de pulpa no se considera valioso como alimento para animales por su alto contenido en fibra y carbohidratos solubles con bajas cantidades de proteína (Morales, 2021).

2.3.1 Valor nutricional de la piña

La piña es una fuente de macro y micronutrientes, está formada principalmente de agua (86 % de su peso). Su componente nutricional más importante son los carbohidratos (sacarosa principalmente, fructosa y glucosa). Además, posee potasio, fósforo, calcio, magnesio, zinc, fibra dietética, vitamina C, A y K, y vitaminas B1, B2, B3 y B6 (Ortega, *et al.*, 2021).

En la Tabla 1, se puede apreciar la caracterización fisicoquímica de la piña de 3 diferentes autores.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de la piña reportadas en unidades por 100 g de muestra (Ramírez y Delahaye, 2011; Ortega *et al.*, 2021, y Peralta 2020).

| Nutrientes | Ortega <i>et al.</i> , (2021) | Ramírez y Delahaye (2011) | Peralta (2020) |
|------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|
| Calorías | 50 Kcal | - | 50.76 Kcal |
| Lípidos | 0.12 g | 0.10±0.0014 g | 0.4 g |
| Carbohidratos | 13.12 g | - | 10.40 g |
| Fibra | 1.4 g | - | 1.9 g |
| Proteína | 0.54 g | 6.27±0.028 g | 0.44 g |
| Azúcares totales | 9.85 g | 77.19±0.0057 g | - |

La piña también posee otros nutrientes como el cobre y folato, las cuales son de mucha importancia para el desarrollo saludable en humanos, además contiene fibra dietética y pocas cantidades de sodio, lípidos, colesterol y proteínas. Pero su alto contenido de humedad (81 a 86 %) la vuelve inestable su vida útil y vulnerable al deterioro (Chauhan *et al.*, 2021).

La variedad en los niveles de azúcares y ácidos son afectados por factores genéticos, ambientales y por el estado de madurez del fruto (Sun *et al.*, 2016).

2.3.2 Valor funcional o nutracéutico de la piña

La piña además de su valor nutritivos, pose valores diuréticos y desintoxicantes por su contenido de vitamina C. B1, B6, B9 y E, y por minerales como el yodo, cobre, manganeso, magnesio y potasio (Peralta, 2020).

Las piñas también son ricas en compuestos ésteres (2 metilbutanoato de metilo, hexanoato de metilo, propanoato de metil-3-(metiltiol), octanoato de metilo y 2-metoxi-4-vinilfenol) asociados a la variedad de sabores de los diferentes tipos de piña. El avance de la madurez de la piña afecta su composición química (dando diferentes perfiles aromáticos), lo que resulta de suma importancia ya que los

principales compuestos bioactivos del fruto son fenoles y flavonoides presentes en sus partes morfológicas (Maimunah *et al.*, 2020).

Entre los compuestos bioactivos presentes en la piña se encuentran los carotenoides, flavonoides, fibra dietética y el ácido ascórbico. En la pulpa, los más presentes son los compuestos antioxidantes (ácido ascórbico y carotenoides), en la cáscara la fibra dietética y los fenoles. El consumo de estos compuestos ayuda a prevenir enfermedades crónico-degenerativas (Ortega *et al.*, 2021).

A pesar de no digerirse o absorberse, la fibra dietética tiene importancia nutricional ya que su bajo contenido calórico lo vuelve una buena opción de consumo para la población actual (Sun *et al.*, 2016). Los componentes más destacados de la fibra dietética de la piña son la hemicelulosa, la celulosa y la pectina, las cuales le dan una alta rigidez a la flexión y resistencia a la tracción (Maimunah *et al.*, 2020).

2.4 Deshidratado o secado de alimentos

El secado solar y deshidratado han sido unas de las metodologías de conservación de los alimentos más empleados por el hombre para no padecer hambruna en tiempos de escasos (De Michelis y Ohaco, 2015). Actualmente, el empleo de energías renovables como la termosolar para conservar los cultivos producidos gracias a la agricultura a nivel global, ha demostrado ser útil, amigable con el medio ambiente al no utilizar o minimizar el consumo de combustibles fósiles y al reducir la cantidad de residuos (Sharma y Chen, 2009).

El deshidratado de las frutas se logra gracias a la difusión y la transferencia de masa y energía, debido a que al rebanar las frutas su superficie de contacto con el aire caliente aumenta. Dicha superficie se encuentra cubierta por una capa de humedad proveniente del agua interna del alimento. Al evaporarse esta capa de agua debido al calor, el agua interna del alimento sale a la superficie intentando reponer la pérdida, hasta llegar a un punto donde la cantidad de humedad superficial se termina y el agua restante ya no puede difundirse al exterior (Donald, 2014).

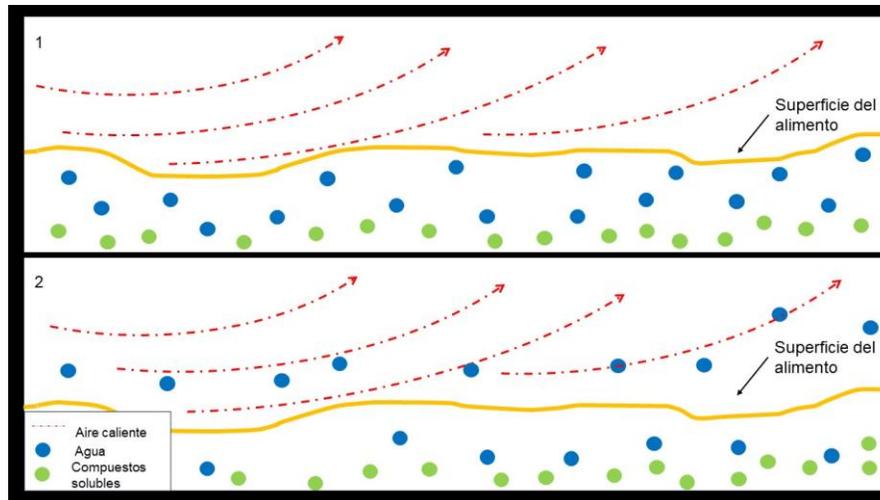


Figura 1. Ejemplo de la difusión y transferencia de masa y energía en los alimentos. Elaboración propia.

Uno de los fenómenos físicos que se desea evitar es la formación de “costras” en la superficie del alimento, lo cual impide el flujo de agua evaporada a la superficie de este. Aunque todavía se desconoce la causa de la formación de dicha película impermeable y dura, se especula que puede deberse a la migración de los sólidos solubles disueltos en el agua que se evapora del alimento, los cuales al llegar a la superficie aunado al calor del entorno queden fijados (Brennan *et al.*, 1998).



Figura 2. Piña parcialmente deshidratada y piña deshidratada. Imágenes tomadas de Kero-mart.com y Pinteres.es.

De Michelis y Ohaco (2015) señalan que las propiedades de cada alimento que se desee secar dificultan en gran medida la construcción, el manejo y la mejora de los equipos de secado. Además, hacen énfasis en que el principal error en el diseño de un equipo de secado se debe a poca consideración de la información disponible del alimento y del proceso. Esto provoca que el apartado de diseño de equipos se convierta en una tarea de prueba y error en equipos de escala piloto.

A pesar de los beneficios anteriormente mencionados sobre el deshidratado de frutas, en muchos países que cuentan con las condiciones ambientales adecuadas para poder hacer uso de estas energías renovables para el procesamiento de sus alimentos, no se cuenta con información de confianza respecto a un favorable aprovechamiento de estas innovaciones tecnológicas (Sharma y Chen, 2009).

Esto fortalece la idea de que, además, de que funciona debido a principios físicos simples, también, la deshidratación de frutas requiere de mucho conocimiento sobre su materia prima, de los fenómenos mediante los cuales se elimina el agua en dicho alimento y la metodología o equipo por el cual se quiere realizar esta tarea de deshidratación.

Actualmente, resulta muy atractivo que los alimentos sean fáciles de preparar. Los polvos de alimentos deshidratados se emplean como ingredientes en formulaciones o como alimentos directamente, también son muy utilizados por su poca alteración fisicoquímica y microbiológica, por conservar en gran medida las cualidades organolépticas, y por su pérdida de volumen lo que los hace prácticos y fáciles de conservar, trasladar, almacenar, procesar, dosificar y utilizar (Cuq *et al.*, 2013).

Desde hace algunos años se ha estudiado el empleo de las técnicas de secado para aprovechar los residuos frutales dentro de la industria alimentaria o de frutos que no poseen cualidades que les den un alto grado de calidad, evitando que estas se desperdicien o buscando aprovechar compuestos presentes en cáscaras o semillas. Por ejemplo, las cáscaras de papaya y berenjena presentan excelentes características para ser aprovechadas y utilizadas dentro de la industria alimentaria o farmacéutica (Vargas *et al.*, 2019).

Rubiano-Charry *et al.* (2019) desarrollaron un producto alimentario a base de pulpa de mango (*Mangifera Indica* L.) añadiendo componentes bioactivos (polifenoles y vitamina C) contenidos en la cáscara del propio, para posteriormente elaborar un rollo comestible a partir de la pulpa anteriormente mencionada, mediante un diseño factorial variando la adición de ácido cítrico y la cantidad de cáscara deshidratada.

Velásquez y Zambrano (2022) investigó y comparó las propiedades fitoquímicas y la capacidad antioxidante en la cáscara deshidratada de la fresa y el melón. Encontró valores significativos de la capacidad antioxidante, flavonoides y polifenoles totales con respecto a otros estudios, evidenciando que los nutrientes presentes son un medio aprovechable tanto en la industria farmacéutica y alimentaria.

Jara (2019) determinó el porcentaje de reemplazo de edulcorante natural (Stevia) en una galleta enriquecida con harina de cáscara deshidratada de piña Golden con una de sustitución que fue evaluada sensorialmente. Encontró que la mejor proporción de harina de cáscara deshidratada de piña es 12 % y harina de trigo 88 %, ya que presentó la mayor aceptabilidad, por lo que esa formulación es la que recomienda para futuros productos con sustitución de harina de piña.

2.4.1 Métodos de deshidratación o secado de los alimentos

La deshidratación es un método de conservación de los alimentos que pretende prolongar su tiempo de vida útil al eliminar el agua libre de un alimento en su totalidad, lo que impide la actividad microbiológica y enzimática durante el almacenamiento, además de disminuir su peso. Al eliminar las partes no comestibles del alimento a conservar se facilita su uso como materia prima en los procesos de producción de alimentos o su incorporación directa en comidas (Gramajo, 2017).

Dependiendo de la técnica de deshidratación que se emplee, las propiedades físicas y químicas del producto serán alteradas, algunas de las más importantes, son: colapso estructural, la aparición de colores oscuros, la pérdida del aroma y sabor y

la degradación de compuestos nutricionales (termolábiles en su mayoría) (Japa, 2022).

2.4.1.1 Secado natural (solar)

Son dispositivos que captan la luz solar para generar calor y elevar la temperatura del aire en su interior, donde contiene los alimentos, los cuales son expuestos al aire caliente o a la radiación solar directa y de esta manera, mediante la transferencia de calor convectivo y por radiación extraer el agua de su interior (Flores, 2011).

Estos equipos presentan ventajas ya que pueden alcanzar temperaturas internas mayores a 100 °C (lo que acorta el tiempo de secado), aunque para la deshidratación no es recomendable pasar de los 65 °C. No requiere ningún combustible, por lo que tampoco genera gases de efecto invernadero (Espinoza y Montiel, 2016).

Si bien se pueden elaborar con materiales asequibles como plásticos, vidrio y madera, se debe tener cuidado e higiene ya que son susceptibles de generar biofilms (comunidades de microorganismos) que pondrían en riesgo la inocuidad del producto (Valencia *et al.*, 2023).

2.4.1.2 Secado por aire caliente (en horno)

El horno se encarga de crear una temperatura estable, para una deshidratación constante del alimento en su interior. Al ser los hornos convencionales un lugar cerrado, provocan que el calor se expanda en su interior, cocinando los alimentos de manera uniforme y rápida. Su fundamento, al igual que el deshidratado natural es a primera ley de la termodinámica, ya que, mediante el trabajo, la transferencia de calor o de masa, la energía se transmite del entorno (caliente) al objeto (frío) permitiendo la deshidratación (Salazar, 2022).

2.4.1.3 Osmodeshidratación o deshidratación osmótica

Consiste en la inmersión de alimentos sólidos troceados o en piezas en una solución acuosa hipertónica (sal, azúcar, sorbitol y glicerol) con mayor presión osmótica y menor actividad de agua que el alimento a deshidratar (Cordero, 2019).

Los principales factores que afectan la velocidad del osmodeshidratado (Tipaz, 2023) son:

- Temperatura de la solución osmótica.
- Velocidad y tipo de agitación de la solución osmótica.
- Concentración, tipo y tamaño del soluto de la solución.
- Relación masa de la solución / masa de producto.

2.4.1.4 Prensado y centrifugación

Ambos son métodos mecánicos. El prensado consiste en separar el líquido dentro de un sistema de fases líquido-sólido por medio de la compresión del sistema, lo que permite al líquido fluir fuera del sistema, mientras el sólido queda retenido en el sistema. Por su parte la centrifugación aplica una fuerza centrífuga al mismo tipo de matriz, provocando que el líquido fluya en dirección de esta misma mientras se retienen los sólidos (Fito *et al.*, 2001).

2.4.1.5 Deshidratado con microondas

Durante este proceso la energía eléctrica se convierte en energía electromagnética (no ionizante). Lo que provoca que la polaridad del campo electromagnético cambie de direcciones millones de veces por segundo y los componentes ionizables o polares del alimento, al intentar alinearse con dicho campo provocan fricción y choques entre sus moléculas dando lugar al aumento interno de temperatura y consecuentemente la pérdida de agua. Este método reduce los tiempos de operación sin elevar demasiado la temperatura, por lo que se pueden evitar ciertos efectos como la reacción de Maillard (Urfalio *et al.*, 2020).

2.4.1.6 Liofilización

Es un proceso en el que primero se congela el producto para posteriormente eliminar el hielo formado por el agua que el alimento contiene mediante sublimación (temperaturas y presiones bajas). Si se requiere remover agua de un alimento sin reducir mucho los componentes volátiles o termo-sensibles y de alta calidad, la liofilización es la mejor opción (Rivera *et al.*, 2019).

Se han realizado comparaciones entre productos liofilizados y productos secados por convección natural o forzada de aire caliente, encontrando que los principales beneficios de la liofilización es que no se pierde características como el sabor o el aroma (Ramírez, 2019).

2.4.2 Técnica de secado por tapete de espuma (Foam–Mat Drying)

El secado por tapete de espuma (FMD) consiste en batir un alimento líquido o junto con un agente espumante o estabilizante para obtener una espuma estable, la cual se extiende sobre una bandeja y se somete a una deshidratación por aire caliente (en horno) entre 40 y 80 °C, para después raspar, moler y tamizar el producto seco para obtener polvos. El FMD tiene mucho potencial para secar alimentos sensibles al calor, pegajosos, muy viscosos y con alto contenido de azúcar que no pueden ser secados por aspersión. Además, de que los productos que se obtienen son porosos y se reconstruyen más fácilmente conservando propiedades nutricionales y sensoriales (Kumar *et al.*, 2022).

Su metodología es aplicable a productos líquidos o semisólidos (jugos, purés y pastas). En comparación con otros métodos de secado es menos costoso y complicado, requiere poco tiempo de ejecución, ya que la velocidad de secado aumenta gracias al aumento del área interfacial del material espumoso, y conserva en buena medida la calidad de los productos (color, flavor y sabor) (Hossain *et al.*, 2021).

El FDM se desarrolló a principios de los años 60 y ha sido recibido como una técnica eficaz ya que carece de deficiencias experimentadas por otros métodos (absorción de agua, propiedades sensoriales y los procesos largos) (Azzizpour *et al.*, 2016).

Parámetros como la temperatura, la velocidad del aire, la humedad relativa del aire de secado, el espesor de la capa de espuma y su composición, afectan la calidad del producto final como las características fisicoquímicas, el contenido de humedad, la densidad aparente y absoluta, la porosidad y la solubilidad. Estos factores son fundamentales durante el almacenamiento del producto ya que afectan en gran medida la estabilidad del polvo y, por ende, su capacidad de rehidratación (Artori-Dehghannya *et al.*, 2019).

2.4.3 Cinética de secado de los alimentos

La cinética está simbolizada por una curva que muestra la variación de la humedad respecto al tiempo, esto brinda información para determinar las condiciones de operación del secador (Salazar, 2020).

En la ingeniería de alimentos, la mayoría de los modelos de fenómenos de transporte se basan en las leyes de difusión de Fick y sus ecuaciones diferenciales de transferencia de energía y masa (López-Mejía *et al.*, 2019).

En el secado de los alimentos ocurren dos procesos fundamentales simultáneamente; la transferencia de calor (que permite la evaporación del líquido) y la transferencia de masa (que permite la difusión del líquido evaporándose dentro del alimento hacia su superficie) (Suarez *et al.*, 2016).

El procedimiento de secado por lo general muestra un breve periodo de secado constante al cual preside uno de velocidad decreciente donde el factor que la controla es la difusión, y esta a su vez es afectada por la temperatura, el tipo de secado, la presión y las características del producto (Arata *et al.*, 2022).

La cinética de secado se modela ajustando las curvas de secado experimentales a (Ertekin y Firat, 2017):

- Modelos empíricos de capa fina (Ej. Wang-Sing y Weibull)
- Modelos semiteóricos derivados de los de Newton (Ej. Lewis y Page)
- Las leyes de Fick (Ej. Exponencial, de dos términos, logarítmicas y Henderson-Pabis)
- Modelos cinéticos de primer orden

La complejidad de los modelos incrementa conforme aumenta el número de constantes involucradas. Dichas constantes de secado ya ajustadas se usan para estimar la difusividad de la humedad y la energía de activación del proceso. Pero no solo sirven para eso, bajo un enfoque similar también es posible modelar la cinética de rehidratación (de absorción de agua) en frutas y verduras liofilizadas, lo que nos indica la capacidad de restitución del producto seco (López-Quiroga *et al.*, 2020).

Los modelos matemáticos nos permiten diseñar un equipo novedoso, modificar sistemas ya establecidos, optimizar los tiempos de secado, emplear la menor energía posible que maximice la pérdida de humedad y mejorar el entendimiento de los mecanismos de secado (Arepally *et al.*, 2017).

2.5 Propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales en polvos de frutos deshidratados

Las propiedades tecno-funcionales son aquellas propiedades no nutricionales que modifica las interacciones entre proteínas de los alimentos, esto se denota primordialmente en la textura del alimento, aunque también alteran su comportamiento en el procesamiento y almacenamiento (Herrera, 2015). Estas propiedades están condicionadas por el diámetro molecular, carga, secuencia y composición de los aminoácidos, por su ordenamiento secundario, terciario y cuaternario, y su interacción con el agua (Pincirolli, 2010).

Cuando el atractivo principal de un alimento no son sus proteínas, resulta más útil el estudio de su comportamiento que de su valor nutricional, debido a que su forma de interactuar al momento de una rehidratación determinará cómo afectará en la elaboración de un producto alimenticio (Mohan y Mellen, 2020).

Varios autores han clasificado las propiedades tecno-funcionales en diferentes grupos. Por ejemplo, Herrera (2015) destaca 3 principales propiedades tecnofuncionales, las cuales se encuentran interconectadas como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades tecno-funcionales de las proteínas en los alimentos. Tomado de Herrera 2015.

| Clasificación de las propiedades tecno-funcionales de las proteínas en los alimentos | |
|---|---|
| De hidratación | Capacidad de adsorción de agua Capacidad de absorción de agua Suculencia Capacidad de Hinchamiento Capacidad de retención de agua Solubilidad en agua Dispersabilidad Viscosidad |
| De superficie | Formación y estabilización de emulsiones Formación y estabilización de espumas |
| Texturales y reológicas | Precipitación Floculación Coagulación Gelificación Texturización |

Esta clasificación atiende a las interacciones entre proteína-agua y proteína-proteína, y para este estudio nos centraremos un poco más en las primeras, ya que al evaluar las posibles aplicaciones de los polvos de piña en productos alimenticios es muy probable que estos polvos se requieran rehidratar. De esta manera, se explora su comportamiento en productos con bajo contenido de agua o que requieran grandes periodos de almacenamiento, en bebidas, en productos como la masa o geles donde la absorción y retención de agua, y capacidad de hinchamiento son muy importantes y repercuten en la viscosidad, volumen y textura del alimento (Cheftel *et al.*, 1993).

2.5.1 Capacidad de absorción de agua

La capacidad de retención de agua es a medida en que un material una vez hidratado puede retener el agua cuando se le aplica una fuerza externa como la centrífuga. Esta característica se ve afectada por factores intrínsecos (interacciones hidrofóbicas o hidrofílicas, puentes de hidrógeno, y las fuerzas de Van der Waals) y extrínsecos (pH, temperatura y concentración y tipo de sales) de las proteínas que lo conforman. Esto afecta directamente a la viscosidad y textura en productos como la masa, dulces y quesos (Kneifel *et al.*, 1991).

2.5.2 Índice de Solubilidad

El índice de solubilidad indica cuando las partículas de un material pulverizado llegan a una disolución y se han dispersado en su totalidad en el agua (Chen y Patel, 2008). Esta propiedad se puede ver afectada por factores como la densidad del polvo, su porosidad, la estructura y la superficie de la partícula (Cano-Chauca *et al.*, 2005).

Otro punto para destacar de esta propiedad es que se debe tener en cuenta cuando se habla de secado, ya que en determinados métodos como el secado por aspersión la concentración del fluido al secar, la velocidad de secado y el pretratamiento que se le dé a la muestra pueden afectar la solubilidad del producto final obtenido (Mendoza-Corvis *et al.*, 2016).

2.5.3 Capacidad de hinchamiento

Indica la capacidad de la harina para incrementar su volumen en presencia de agua, esta propiedad se ve afectada por la composición de la harina, su porosidad y el tamaño de la partícula (Bravo y Ramírez, 2023). Se refiere a la aprehensión de agua mediante una cavidad proteica, este fenómeno es un preámbulo de la disolución (Zayas, 1997). Esta propiedad se ve afectada por el origen de la proteína, el tamaño de la partícula, su pH y la temperatura del medio. Además, se expresa en el espesamiento y viscosidad del alimento, lo cual afecta directamente al flujo de este (Pomeranz, 1991).

La capacidad de hinchamiento depende de los factores anteriormente mencionados ya que está relacionada directamente con la absorción de agua, de esta manera, a mayor relación superficie/volumen (menor tamaño de partícula), mayor contenido de proteína y menor de amilosa, más capacidad de hinchamiento tendrá la harina (Martín, 2022).

2.5.4 Densidad

El conocimiento de la densidad aparente y compactada son muy importantes, ya que anticipa de posibles problemas en el flujo de polvos, ya que las propiedades de este son afectadas por la densidad (Santamaría, 2018).

La densidad en los polvos se divide en 2 tipos (FEUM, 2016):

- a) Densidad aparente: Es la concordancia entre la masa de la muestra de polvo sin haber sido sometida a presión y su volumen, tomando en cuenta los espacios entre las partículas de polvo. Esta medición se ve afectada por la manipulación previa al ensayo y por el método mediante el cual se obtuvo el polvo.
- b) Densidad compactada: Se obtiene al compactar mediante golpes el recipiente donde se hace la medición con la misma cantidad de polvo.

La comparación de ambos parámetros (densidad aparente y densidad compactada) sirve para poder conocer el flujo del polvo, que da una pauta de cómo debe de ser su manejo al momento de querer emplearlo en la industria. Además, con estas pruebas se puede obtener, tanto el índice de compresibilidad (Índice Carr) como el índice de capacidad de flujo de polvo (Índice de Hausner), los cuales brindan información sobre la interacción entre partículas y su tendencia a compactarse (en polvos que fluyen libremente, la diferencia entre densidades es menor).

Estos diferentes parámetros que incluye la densidad pueden ser un indicativo de calidad (FEUM, 2016), como se aprecia en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de compresibilidad e índice de Hausner (Feum, 2016).

| Clasificación de calidad en polvos según el índice de compresibilidad e índice de Hausner | | |
|--|-------------------------------------|-------------------|
| Propiedades del flujo | Índice de compresibilidad (Carr) | Índice de Hausner |
| Excelentes | 5 - 11 | 1.00 – 1.11 |
| Buenas | 12 - 17 | 1.12 – 1.18 |
| Aceptables | 18 - 22 | 1.19 – 1.34 |
| Pobres | 26 - 31 | 1.35 – 1.45 |
| Muy pobres | 35 - 38 | 1.46 – 1.59 |
| Extremadamente pobres | > 38 | > 1.60 |

2.5.5 Acides titulable y pH

Cuando se quiere afianzar que los productos cumplen con atributos como el aspecto, textura, sabor y contenido nutricional, se debe determinar la acidez y el pH de los productos, de esta forma se afianza que tienen propiedades uniformes y definidas. Por ejemplo, los cambios de pH y acidez titulable (fuera de los estándares establecidos por la normativa) en la leche de las vacas se deben a la presencia de bacterias (Montes y Solano, 2022).

Es importante no confundir la acidez con el pH; la acidez titulable indica la concentración de iones de hidrógeno presentes por el conjunto de moléculas químicas presentes en un alimento al interactuar con hidróxido de sodio (concentración de ácido presente en un alimento). Mientras que el pH mide la acidez del alimento en función de iones hidrógenos presentes en la muestra (Toledo, 2023).

El cambio de nivel de acidez en los frutos se produce durante la maduración de este, la cual causa una disminución de dicha acidez total valorable. Esta variación en la acidez titulable se emplea para determinar la intensidad de sabor ácido de los alimentos. Además, es importante en el monitoreo de poblaciones

microbianas en el alimento, de su actividad enzimática, de la estabilidad del alimento y en procesos posteriores como la clarificación de jugos (Medina, 2003).

2.5.6 Índice de pardeamiento

El pardeamiento es el proceso por el cual los alimentos adquieren un color oscuro, esto se puede deber a cambios fisicoquímicos o enzimáticos y pueden provocar un debilitamiento de la firmeza del alimento debido a la degradación de pectinas en la pared celular del organismo vegetal. Esta propiedad tecnofuncional se busca en productos donde el color del producto lo requiere para ser agradables al paladar del consumidor, por ejemplo: el café, el té, el cacao, la carne o las pasas. El pardeamiento no es deseable en productos que se suelen consumir frescos como las frutas, algunas hortalizas y los mariscos (Cardona, 2020).

En la Piña, el cambio de color en la luminosidad se debe al efecto de la enzima polifenoloxidasa, la cual provoca la deshidratación de la superficie del fruto mediante la pérdida gradual de agua al ser cortada en rebanadas. Además, la degradación de los carotenoides por oxidación o pardeamiento no enzimático (temperaturas altas), los cuales hacen que la tonalidad amarilla natural de la fruta se oscurezca (Buitrago-Dueñas *et al.*, 2018).

2.5.7 Valor nutricional en polvos de frutos deshidratados

El sabor, color y la capacidad de retención de agua de los polvos de frutas los hacen una muy buena opción para jugos instantáneos, refrigerios, salsas para pastes y alimento para bebés (Sangamithra *et al.*, 2015). Los residuos agroindustriales son una oportunidad de generación de productos funcionales que disminuyan el impacto negativo que estos residuos provocan al ambiente y que brinden beneficios nutricionales y económicos (Arboleda, 2020).

Existen estudios que han demostrado que productos de IV gama como la zanahoria, la col, el apio, el puerro y el brócoli, tienen potencial para una valorización integral una vez que se transforman en productos deshidratados en polvo (Bas, 2023).

Actualmente existe una gran variedad de complementos alimentarios en el mercado, pero las tendencias del consumidor contemporáneo exigen componentes

(vitaminas y minerales) 100 % de origen vegetal. Es por eso que se está incursionando en la formulación de complementos alimenticios empleando como base la fruta deshidratada, añadiéndoles proteínas (vegetales, de granos o cereales) ricas en nutrientes que refuercen sus valores nutricionales (Noriega, 2023).

Un tercio de la población mundial es asediada por la deficiencia de micronutrientes (malnutrición), ante esto la fortificación de los alimentos con polvos deshidratados es una alternativa ventajosa ya que la población ingiere los nutrientes que necesita en los productos que suelen consumir y sin modificar su dieta (Cruz *et al.*, 2023).

2.5.8 Valor funcional o nutracéutico en polvos de frutos deshidratados

La obtención de polvos mediante la transformación de residuos de frutas y hortalizas de la industria agroalimentaria es un proceso en auge, ya que permite mantener propiedades funcionales y antioxidantes en formas concentradas y son de empleos simples cómo aditivos, aliños o en formulaciones de alimentos sólidos o líquidos (Andrés, 2019).

El tratamiento térmico aplicado en el proceso influye en la actividad antioxidante del producto final, por esto es recomendable que las temperaturas sean bajas y evitar que se pierda la actividad antioxidante. Aunque, esto significa mayores tiempos de operación (Arboleda, 2020)

En los residuos de la industria alimentaria (cortezas, semillas, pieles y pulpas de frutas y hortalizas) poseen cantidades considerables de compuestos antimicrobianos, colorantes y aromatizantes, por lo que su uso como aditivos alimentarios naturales es de mucho interés (Ayala-Zavala *et al.*, 2011).

Gracias a ensayos de digestión gastrointestinal *in vitro* se tiene registro que los polvos obtenidos a partir de residuos de hortalizas tienen potencial de para aumentar el valor nutricional en formulaciones alimentarias. Lo que cubriría la creciente demanda de productos naturales con valor nutricional añadido y que aportan beneficios a la salud (Bas, 2023).

3. Justificación

A lo largo de la cadena de producción de alimentos, se pierden y desechan cantidades exageradas de alimentos, desde su cosecha, hasta el punto de consumo (ya sea un comercio o el hogar del consumidor). Esta situación crea una paradoja donde por un lado se tiran muchos alimentos a la basura, lo cual no solo representa una pérdida no solo económica, sino también de recursos (agua, suelo, fertilizantes, etc.), y por el otro lado, al menos un tercio de la población mundial se encuentra en una situación de inseguridad alimentaria o de malnutrición. Además de que los desechos de la industria alimentaria contribuyen al cambio de efecto invernadero por los gases de efecto invernadero que se generan al degradarse la materia orgánica. El caso de las frutas tropicales como la piña, es particular ya que su elevado costo de producción y comercialización, la vuelven una fuente de ingresos muy importante para los productores de este fruto.

Los polvos de alimentos deshidratados son una excelente opción para impedir el avance de estado de madures en las frutas y hortalizas, ya que, al disminuir su actividad de agua, y ser almacenados de forma adecuada, evitan ataques microbiológicos y cambios fisicoquímicos, también facilitan su manipulación y transporte en procesos alimentarios. La técnica de secado por tapete de espuma (FMD por sus siglas en inglés) presenta ventajas frente a otras técnicas empleadas en la obtención de los polvos. Su metodología es muy simple, acorta el tiempo de secado, disminuye costos de materiales y reactivos y brinda buenas cualidades organolépticas al producto obtenido.

La evaluación de las propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales en los polvos deshidratados, determina el nivel de calidad del producto. Además, permiten hacer una comparativa, no solo entre las propiedades nutricionales que pueda perder o mantener el alimento una vez procesado, sino también entre diferentes metodologías que se podrían usar para obtener los polvos. Las propiedades tecnofuncionales nos permiten visualizar el campo de aplicación de los polvos en la industria alimentaria, desde un alimento directo, un complemento alimentario o un añadido en un producto ya existente.

El presente proyecto pretende evaluar y cuantificar las propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales del polvo obtenido a partir de la deshidratación de la piña en estado maduro (antes de deteriorarse), mediante la técnica de secado por espuma (FMD). Lo cual presenta una alternativa de técnica de conservación que difiere, de los métodos convencionales; por ejemplo, el tradicional secado al sol.

4. Hipótesis

Las espumas de pulpa de piña mejoraran las propiedades tecnofuncionales del polvo deshidratado al añadirles diferentes concentraciones de proteína y almidón.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Evaluar las propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales de polvos obtenidos de espumas (Foam-Mat Drying) de piña adicionadas con proteína y almidón.

5.2 Objetivos específicos

- 1) Obtener polvos de piña a partir del método de secado por espuma (Foam-Mat Drying) con diferentes concentraciones de proteína-almidón.
- 2) Evaluar y aplicar los modelos matemáticos a los datos de secado de las diferentes espumas deshidratadas.
- 3) Cuantificar las propiedades tecnofuncionales (Sólidos solubles totales, acidez titulable, pH, colorimetría, índice de pardeamiento, capacidad de absorción de agua, capacidad de hinchamiento, índice de solubilidad, estabilidad de espuma y densidad) de los diferentes polvos de piña.
- 4) Cuantificar las propiedades funcionales y antocianinas presentes en los polvos deshidratados.

6. Metodología

El experimento se realizó de agosto a octubre de 2023 en la planta piloto agroindustrial del Campo Experimental Zacatecas (CEZAC; 22° 54' N, 102° 39' O) con una altitud de 2 197 msnm, donde las piñas se lavaron y se posteriormente se les retiró de manera manual la corona y la cáscara con ayuda de un cuchillo casero. Una vez peladas las piñas, se seccionó el fruto para proceder a molerlos en un Nutribullet (600W, Modelo NB-201, hecho en china) por 1 min. La pulpa obtenida se mantuvo en refrigerador (marca Metalfrio, modelo VN29CB1, hecho en Brasil) a una temperatura de -2 °C en envases herméticos desechables de plástico transparente (capacidad ½ L. de la marca Reyma), y se le realizó una caracterización mediante un análisis fisicoquímico de la pulpa, después se realizaron las espumas con ayuda de aditivos espumantes y adicionando proteína y almidón a una concentración de acuerdo a los tratamientos descritos más adelante, posteriormente las espumas se secaron y se obtuvo la curva de secado para cada tratamiento, finalmente se molió el producto para generar los polvos (Foam-Mat Drying) que fueron analizados para su caracterización.

6.1 Preparación de la materia prima

Para este trabajo se utilizó piña una fruta tropical perenne (*Ananas Comosus L.*) de la variedad "Piña miel". Esta fruta fue adquirida en un mercado local del municipio de Calera de Víctor Rosales, Zacatecas. México. De origen desconocido y empacada por la empresa Cirol (sucursal distribuidora en Aguascalientes, México). Se utilizó fruta madura con un 100% de coloración amarilla en la superficie del cuerpo de la fruta. Las características fisicoquímicas de la pulpa de piña utilizada fueron:

- 1) Sólidos solubles totales de 11.18 ± 0.402 °Brix obtenidos con un refractómetro digital tipo paleta (marca Atago, modelo PR-101 Alfa, hecho en Japón).
- 2) Acidez titulable de 1.085 ± 0.015 (% ácido cítrico) obtenido mediante titulación de hidróxido de sodio *NaOH* con la metodología descrita por la FAO

- (2002) y utilizando un titulador automático (marca Mettler Toledo, modelo T50, hecho en Japón).
- 3) pH de 3.03 ± 0.015 obtenido con un potenciómetro integrado en el titulador Mettler Toledo.
 - 4) Colorimetría de la pulpa de $L^* 61.205 \pm 2.69$ $a^* 6.417 \pm 1.49$ y $b^* 41.384 \pm 3.39$ obtenidos con un espectrofotómetro de esfera SP60 (marca X-rite, modelo SP60).
 - 5) Concentración de antocianinas totales de 1221.76 ± 285.5 mg de cianidina 3-glucósido/10 mL de muestra de acuerdo con la metodología descrita por Abdel-Aal y Hucl (1999).



Figura 3. Piña madura a un 100% de color amarillo en la superficie del cuerpo de la fruta próxima a considerarse como desecho.

6.2 Tratamiento y preparación de espumas

El experimento consistió en la preparación de espumas (Foam-Mat Drying, FMD) con pulpa de piña y caracterización fisicoquímica y tecnofuncional de los polvos obtenidos. Para la preparación de espumas, se utilizó un diseño factorial 2^2 . El primer factor (%Proteína) consiste en adicionar a la pulpa, proteína vegetal de chícharo (*Pisum sativum*) con dos niveles de contracción al 0 y 1%, el segundo factor (%Almidón) consiste en adicionar a la pulpa, almidón de tapioca con dos

niveles de contracción al 0 y 1% (Tabla 4). La preparación de las espumas se realizó de acuerdo con los protocolos de Seerangurayar *et al.* (2017), Saad *et al.* (2021) y Shivani *et al.* (2021). Se utilizaron los aditivos de cabroximetilcelulosa (CMC) al 0.5% y maltodextrina (MD) al 2.5%. Los aditivos y las concentraciones de proteína y almidón según corresponda a cada tratamiento, se mezclaron de forma suave y manual con la ayuda de un agitador de vidrio, previamente pesados con una balanza analítica marca Mettler Toledo, modelo MS104TS/00. Posteriormente se colocó la pulpa en una batidora (marca, Oster Perform INOX, modelo FPSTSM2711 de 600W de 6 velocidades, hecho en China) y se operó en la primera velocidad por 5 min para espumar la pulpa.

Tabla 4. Tratamientos de la pulpa para la elaboración de espumas.

| Tratamiento | % CMC | % MD | % Proteína | % Almidón |
|-------------|-------|------|------------|-----------|
| 1 | 0.5 | 2.5 | 0 | 0 |
| 2 | 0.5 | 2.5 | 0 | 1 |
| 3 | 0.5 | 2.5 | 1 | 0 |
| 4 | 0.5 | 2.5 | 1 | 1 |

Para medir la estabilidad de las espumas para cada tratamiento se realizó un ensayo de la estabilidad en espuma partiendo por lo descrito por López-Monterrubio *et al.*, (2020). Este método consiste en preparar y se agitar 45 mL de las diferentes pulpas de piña con un espumador de leche electrónico (marca Rosh, modelo forte01, hecho en China) durante 5 minutos. La espuma resultante se transfirió a probetas de 100 mL para medir su volumen y una vez tomado el volumen inicial se procedió a observar si existían cambios en este durante las próximas 3 horas registrando observaciones cada media hora. El porcentaje de expansión de espuma se calculó utilizando la ecuación 1 (López-Monterrubio *et al.*, 2020).

$$Ec. 1: \text{Expansión de la espuma (\%)} = \left(\frac{A - B}{B} \right) * 100$$

Donde:

$A = \text{Volumen después del agitado (mL)}$

$B = \text{Volumen antes del agitado (mL)}$

6.3 Curva de secado y obtención de polvos

Se obtuvieron por duplicado las curvas de secado las espumas de cada tratamiento. Se colocaron 180 g de espumas (masa inicial; M_i) distribuidas de manera uniforme y considerando una lámina con un espesor de 0.5 cm dentro de moldes de aluminio (marca G & S Metal Products Company OvenStuff de 9 pulgadas de diámetro, hecho en U.S.A). Estas muestras fueron colocadas sobre balanzas digitales automatizada que registra y almacena simultáneamente el par de datos de tiempo y peso con una precisión de ± 0.01 g. Estas balanzas se localizaban dentro del horno Memmert de conversión mecánica (marca Equipar, modelo UF55 PLUS, hecho en Alemania). El secado se llevó a cabo a 60 °C durante 5 h, hasta alcanzar una masa constante. Durante este tiempo se registró con una frecuencia de un minuto el peso de la muestra, es decir, el peso de la muestra humedad (W_h) en el j-esimo tiempo. Después de las 5 horas, los moldes eran retirados del horno para recuperar las hojuelas de la espuma deshidratada con ayuda de una espátula y fueron pesadas para obtener el peso seco de muestra (W_s). Posteriormente, se molieron las hojuelas en un mortero por 5 min hasta obtener un polvo granulado. Finalmente, el polvo se etiquetó de acuerdo con su tratamiento y empacó en bolsas de celofán que a su vez iban dentro de bolsas de papel para evitar su exposición a la luz. Las muestras se almacenaron a temperatura ambiente (20 ± 2.0 °C).

También, se obtuvo el contenido de humedad final de la muestra (%H) utilizando la ecuación 2.

$$\text{Ec. 2: \%H} = \left[\frac{M_i - W_s}{W_s} \right] * 100$$

Donde:

$M_i = \text{Masa de la muestra húmeda inicial (g)}$

$W_s = \text{Masa de la muestra seca (g)}$

Por otro lado, se calibraron y evaluaron modelos de capa delgada para representar, estimar y predecir la razón de humedad de las espumas de piña.

La razón de humedad observada para el *j*-ésimo tiempo (RH_j), se obtuvo con la siguiente manera (ecuación 3):

$$Ec. 3: RH_j = \frac{W_{h_j}}{M_i}$$

Donde:

W_{h_j} = masa del producto en el *j*-ésimo tiempo (g)

M_i = masa del producto en el tiempo inicial (g)

Los modelos de capa fina (tabla 5) fueron programados en Matlab utilizando el procedimiento de calibración con mínimos cuadrados no lineal que se encuentra programado en la función `lsqnonlin` de la herramienta de Optimización de Matlab para regresiones no lineales, y la evaluación se realizó con un conjunto de datos distinto al utilizado para la calibración.

Tabla 5. Modelos de capa delgada para el cálculo de la razón de humedad.

| Nombre | Modelo |
|---------------------------------|---|
| 1) Newton | $RH = \exp(-kt)$ |
| 2) Page | $RH = \exp(-kt^n)$ |
| 3) Henderson y Pabis | $RH = a \exp(-kt^n)$ |
| 4) Logarítmico | $RH = a \exp(-kt) + c$ |
| 5) Dos términos | $RH = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$ |
| 6) Dos términos exponencial | $RH = a \exp(-k_0t) + (1 - a) \exp(-k_1t)$ |
| 7) Aproximación por difusión | $RH = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$ |
| 8) Henderson y Pabis Modificado | $RH = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(ht)$ |

Para determinar el desempeño de los modelos se estimaron los siguientes estadígrafos:

- 1) el error absoluto medio (MAE; Ec. 4).
- 2) la raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE; Ec. 5).

3) la eficiencia propuesta por Nash y Sutcliffe (E; Ec. 6).

$$Ec. 4: MAE = \frac{(\sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_t|)}{n}$$

$$Ec. 5: RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_t)^2}$$

$$Ec. 6: EFF = 1 - \frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_t)^2}{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Donde:

y_i = Valor de RH

\hat{Y} = Valor estimado de RH

\bar{Y} = Promedio de los valores de RH

n = Número de mediciones

6.3 Análisis fisicoquímicos de los polvos de piña

6.3.1 Sólidos solubles totales

Para determinar los °Brix, se recuperó un poco del sobrenadante sobrante en los tubos Falcon de 50 mL de la técnica de capacidad de absorción de agua, hinchamiento e índice de solubilidad (mencionados en secciones posteriores) y con ayuda del refractómetro digital Palette se tomó registro de los °Brix para los diferentes polvos de piña.

6.3.2 Acidez titulable

Se pesaron 2.5 gramos del polvo en tubos Falcon de 50 mL. Se le añadieron 30 mL de agua destilada y se centrifugaron a 4000 RPM por 5 min a temperatura ambiente. El sobrenadante de cada tubo se ajustó a 60 mL y su acidez fue determinada con hidróxido de sodio (al 0.1 N) con ayuda del equipo Mettler Toledo anteriormente mencionado.

6.3.3 pH

De igual manera que las pulpas, el pH de los polvos se determinó en el mismo equipo donde se realizó la acidez titulable.

6.3.4 Colorimetría de los polvos

Se tomó una muestra significativa de los polvos (10 g aproximadamente), para verterlo arriba de una caja petri, y con ayuda del equipo espectrofotómetro SP60 Series anteriormente mencionado, se tomó la lectura del color en coordenadas del sistema CIELab.

6.3.5 Índice de pardeamiento

El índice de pardeamiento se determinó de acuerdo con lo descrito por Gao *et al.* (2022). En condiciones lo más oscuras posibles, se pesaron 2.5 g de polvo en tubos Falcon, se les añadió 10 mL de agua. Se agitó en el vórtex por 1 minuto para después ser centrifugado a 4000 rpm por 15 min a temperatura ambiente en la centrífuga eppendorf anteriormente mencionada. Posteriormente del sobrenadante se tomó una muestra de 250 μ L y se colocó en las multiceldas del espectrofotómetro UV-Vis (marca Thermo Científico, modelo Multiskan Go, hecho en U.S.A.) y se midió la absorbancia a 420 nm.

6.3.6 Capacidad de absorción de agua, índice de solubilidad y capacidad de hinchamiento

Se determinó el índice de solubilidad, de hinchamiento y de absorción de agua según lo descrito por Kamali *et al.*, (2022).

Se pesaron 2.5 g de la muestra. Se le añadió 30 mL de agua destilada y se dejó en agitación magnética a 800 RPM por 30 min. Después la solución se centrifugó (marca Eppendorf, modelo 5702 RH, hecho en Alemania) a 4000 rpm por 5 min a temperatura ambiente El sobrenadante se vertió en cajas Petri previamente pesadas para secarlas en la estufa de secado (Marca Fisher Scientific, modelo 655G, hecho en U.S.A.) a 105°C por 18 horas, y se registró el peso final. Asimismo, se registró el peso del precipitado obtenido después de la centrifugación.

Con ayuda de las ecuaciones 7, 8 y 9 y los pesos registrados se calcularon la capacidad de absorción de agua, de hinchamiento e índice de solubilidad (Kamali, *et al.*,2022).

$$Ec. 7: g_{H_2O} / g_{muestra} IAA = \left(\frac{C}{A}\right)$$

$$Ec. 8: \% ISA = \left(\frac{A}{B}\right) * 100$$

$$Ec. 9: g_{H_2O} / g_{muestra} ICH = \frac{C}{B - A}$$

Donde:

A = Peso de los sólidos secos del sobrenadante.

B = Peso inicial del polvo seco.

C = Peso de los sólidos del precipitado.

6.3.7 Antocianinas totales

Para determinar las antocianinas totales de los polvos se realizó la misma metodología descrita en para este ensayo en el apartado 11.5, con la única diferencia que en los polvos no se requirió ajustar el pH con HCl 4 N.

6.3.8 Densidad de los polvos

La densidad y compresibilidad de los polvos obtenidos se determinó basándose en la metodología descrita por Hasan *et al.* (2022).

Se pesó por triplicado 3 g del polvo para después verterlo suavemente dentro de probetas de 50 mL para tomar la lectura de su densidad aparente. Después, en una mesa, sobre un paño doblado se daban 10 golpes a la probeta para compactar el polvo y tomar el dato de su densidad compactada.

Se utilizaron las ecuaciones 10, 11, 12 y 13 para calcular densidad aparente y compactada (FEUM, 2016).

$$Ec. 10: \text{Densidad aparente} = \frac{\text{Masa del polvo}}{\text{Volumen del polvo}}$$

$$Ec. 11: \text{Densidad compactado} = \frac{\text{Masa del polvo}}{\text{Volumen del polvo compactado}}$$

$$Ec. 12: \text{Índice de Hausner} = \frac{\text{densidad compactada}}{\text{densidad aparente}}$$

$$Ec. 13: \text{Índice de Carr} = \left[\frac{\text{densidad compactada} - \text{densidad aparente}}{\text{densidad compactada}} \right] * 100$$

6.4 Análisis estadístico

Todas las determinaciones se realizaron por duplicado y se analizaron mediante un diseño factorial 2², donde el factor 1 fue la concentración de proteína, el factor 2 fue la concentración de almidón, ambos factores con dos niveles de contenido (0 y 1%). La significancia se estableció en $p \leq 0.05$ (SAS versión 9.4, SAS Institute Inc., NC, EE. UU.).

7. Análisis de resultados

7.1 Estabilidad de la espuma en pulpa

Las espumas preparadas con los diferentes tratamientos presentaron una separación de fases en diferentes tiempos promedio, siendo FM4 (2 h y 12 min) la espuma que tardó más tiempo en presentar la separación de fases, seguido de FM3 (2 h y 7 min), FM2 (1h y 42 min) y FM1 (1h y 26 min).

Los resultados del análisis estadístico señalan que existen diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) en el porcentaje de expansión de espuma, lo que indica que la presencia de estos factores en la pulpa de la piña, modifican el porcentaje de expansión de las espumas al momento del batido.

El FM4 presentó mayor porcentaje de expansión de la espuma ($21.85 \pm 1.7\%$), además de una diferencia estadística significativa ($p > 0.05$) con el resto de los tratamientos. FM3 ($16.29 \pm 1.7\%$) también presentó diferencias estadísticas

significativas respecto de FM1 ($10.96 \pm 0.1\%$) y FM2 ($11.22 \pm 0.4\%$), los cuales son estadísticamente iguales entre sí. Esto significa que la presencia de proteína en la pulpa batida incrementa el porcentaje de expansión de volumen durante el batido más de lo que lo hace el almidón.

La expansión de las espumas de piña es menor a las reportadas en otros trabajos como el de Watharkar *et al.* (2021) quienes reportan valores desde 9.09 a 51.78% de expansión de espuma en pulpa de plátano silvestre madura (*Musa balbisia*) añadiendo diferentes concentraciones de leche desnatada en polvo y variando los tiempos de batido.

Khamiae y Rojanakorn, (2018) reportaron un incremento de 109.04 a 187.25 % en la formación de espuma de arilo de maracuyá al variar la concentración de metilcelulosa (0.75, 1.5, 2.25 y 3%) y el tiempo de batido (0, 10, 20 y 25 min), lo que podría indicar que tal vez aún se pueda obtener un mayor volumen de espuma al momento del batido de la pulpa de piña, pero es un caso que se debe estudiar aparte.

La interacción entre la fibra de la piña disminuye la tensión, las fuerzas de cohesión de la matriz del almidón y su expansibilidad, lo que disminuye su resistencia mecánica. Además, las interacciones de la fibra y el almidón y de almidón-almidón alteran la matriz polimérica y esto afecta a las propiedades de los compuestos de las espumas de piña (Cabanillas *et al.*, 2019).

Los polifenoles y las proteínas presentan beneficios estructurales y funcionales en la salud humana. Las proteínas de origen animal en matrices frutales forman espuma rápidamente (2 min aproximadamente) en comparación con las de origen vegetal (8 min aproximadamente), sin embargo, las proteínas vegetales (modificadas o no) brindan espumas significativamente más estables y al añadir polifenoles producen burbujas más pequeñas (Díaz *et al.*, 2022).

Las proteínas son buenos agentes espumantes porque aportan estabilidad al sistema al formar una película viscoelástica que recubre a las burbujas y mejora la reología del polvo (Hardy y Jideani, 2015).

Los aislados de proteína de soja y guisante poseen propiedades funcionales que mejoran el batido, la formación de espuma, la unión de agua, la emulsificación y la gelificación (Thuwapanichayanan *et al.*, 2012).

Una disminución en la formación de espumas al emplear proteínas se puede atribuir a una menor dispensabilidad de la proteína en el puré de la fruta, esto disminuye la interfaz aire-líquido (Brar *et al.*, 2020).

Tabla 6. Valores promedio de la expansión de la espuma.

| Factor/Interacción | Capacidad de expansión (%) |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Concentración de proteína | |
| 1 | 19.07 a |
| 0 | 11.09 b |
| DMS | 1.622 |
| Significancia (p > F) | > 0.0001 |
| Concentración de almidón | |
| 1 | 16.53 a |
| 0 | 13.62 b |
| DMS | 1.622 |
| Significancia (p > F) | 0.0033 |
| Interacción proteína x almidón | |
| | 0.0055 |
| FM1 | 10.96±0.1 c |
| FM2 | 11.22±0.4 c |
| FM3 | 16.29±1.7 b |
| FM4 | 21.85±1.7 a |
| DMS | 2.2941 |
| Significancia (p > F) | > 0.0001 |

*Por efecto principal e interacción, dentro de las columnas, los valores promedio con letras distintas son estadísticamente diferentes con base a la diferencia mínima (DMS) de la prueba de Fisher con $p \leq 0.05$.

7.2 Modelado Matemático

De manera general las figuras 4, 5, 6 y 7 muestran la pérdida de la razón de humedad en función del tiempo de los modelos calibrados (a) y evaluados (b) para los tratamientos 1 al 4 respectivamente. Se puede observar cómo la razón de humedad tiene un comportamiento decreciente (casi lineal) a través del tiempo, en todos los tratamientos. También se aprecia que la mayoría de las curvas muestran un comportamiento asintótico alrededor de 250 minutos, lo que significa que el tiempo de la operación puede reducirse aproximadamente a 4 horas que es cuando se alcanza una humedad menor al 10 %. En promedio, las espumas mostraron un porcentaje de humedad inicial del 86.44 %, al finalizar la humedad fue de 1.87 %. El FM3 mostró una mayor pérdida de humedad, ya que redujo el porcentaje de humedad de 85.4 a 0.054%.

En la Tabla 7 se aprecian los estadísticos de los diferentes modelos ajustados al secado de espumas de piña (FM1, tratamiento control). Los valores de EFF en la calibración y en la evaluación fueron aceptables en todos los modelos, pero el MAE aumentó en los modelos 1,2,3 y 4 al ser evaluados. Los valores globales indican que los modelos 5 y 8 presentan un RMSE < 0.083 y mayor EFF > 0.992, es decir, predicen adecuadamente la RH y son los de mayor ajuste.

Tabla 7. Datos de la espuma Foam-Mat Drying (FM1), tratamiento control calibrados y evaluados a diferentes modelos matemáticos.

| Número | Modelos matemáticos | Coeficientes | Calibración | | | Evaluación | | |
|--------|------------------------------|--|-------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | | | RMSE | MAE | EFF | RMSE | MAE | EFF |
| 1 | Newton | $K = 0.007;$ | 0.104 | 0.319 | 0.987 | 0.279 | 0.787 | 0.905 |
| 2 | Page | $K = 0.003;$ $n = 1.174;$ | 0.054 | 0.151 | 0.996 | 0.247 | 0.757 | 0.926 |
| 3 | Henderson y Pabis | $K = 0.002; n = 1.21;$ $a = 0.983;$ | 0.053 | 0.146 | 0.997 | 0.245 | 0.761 | 0.927 |
| 4 | Logarítmico | $K = 0.008;$ $a = 1.055; c = 0;$ | 0.083 | 0.255 | 0.992 | 0.267 | 0.780 | 0.914 |
| 5 | Dos términos | $K = 0.008;$ $K1 = 622.361;$ $a = 1.055; b = 0;$ | 0.083 | 0.255 | 0.992 | 0.083 | 0.255 | 0.992 |
| 6 | Dos términos exponencial | $K = 0.007;$ $K1 = 0.017;$ $a = 0.425;$ | 0.104 | 0.319 | 0.987 | 0.104 | 0.319 | 0.987 |
| 7 | Aproximación por difusión | $K = 0.244;$ $a = 0; b = 0.029;$ | 0.104 | 0.319 | 0.987 | 0.104 | 0.319 | 0.987 |
| 8 | Henderson y Pabis modificado | $K = 0.008; a = 1.055;$ $b = 0;$ | 0.083 | 0.255 | 0.992 | 0.083 | 0.255 | 0.992 |

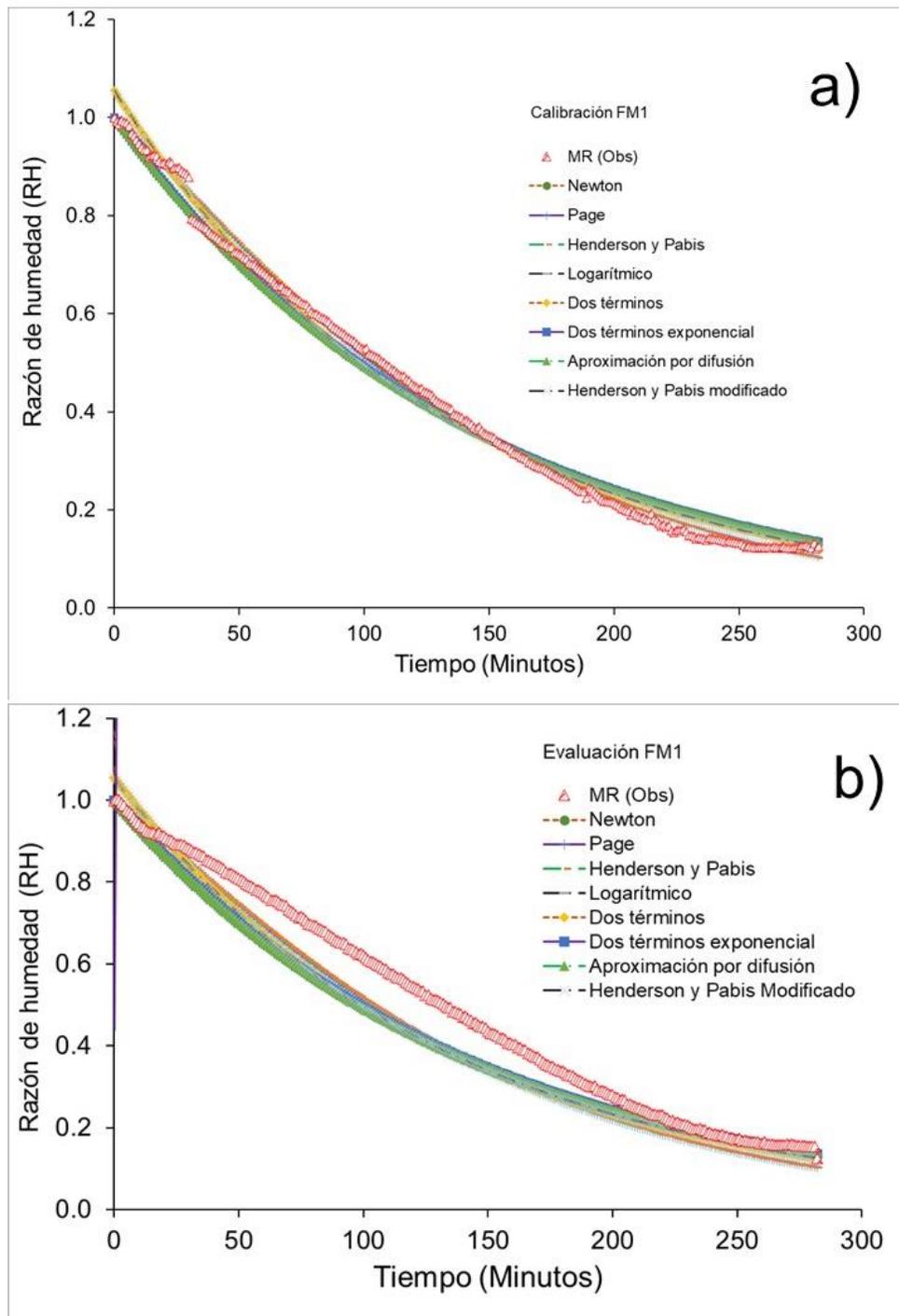


Figura 4. Razón de humedad (RH) de los datos de FM1 (tratamiento control) calibrados y evaluados en diferentes modelos matemáticos.

La Tabla 8 (correspondiente al FM2) muestra que los valores de EFF reportados en la calibración y evaluación también fueron aceptables. Por su parte el RSME disminuyó en la evaluación de los modelos. Los valores globales señalan que los modelos con mejor ajuste son el 2 y 3 ya que presentan un RSME < 0.067 y EFF > 0.995 .

Tabla 8. Datos de la espuma Foam-Mat Drying (FM2), calibrados y evaluados a diferentes modelos matemáticos.

| Número | Modelos matemáticos | Coeficientes | Calibración | | | Evaluación | | |
|--------|------------------------------|--|-------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | | | RMSE | MAE | EFF | RMSE | MAE | EFF |
| 1 | Newton | $K = 0.007$; | 0.170 | 0.524 | 0.969 | 0.140 | 0.431 | 0.978 |
| 2 | Page | $K = 0.001$; $n = 1.332$; | 0.060 | 0.175 | 0.996 | 0.073 | 0.225 | 0.994 |
| 3 | Henderson y Pabis | $K = 0.001$; $n = 1.449$; $a = 0.956$; | 0.045 | 0.124 | 0.998 | 0.073 | 0.229 | 0.994 |
| 4 | Logarítmico | $K = 0.008$; $a = 1.084$; $c = 0$; | 0.139 | 0.427 | 0.979 | 0.113 | 0.325 | 0.986 |
| 5 | Dos términos | $K = 0.008$; $K1 = 622.361$; $a = 1.084$; $b = 0$; | 0.139 | 0.427 | 0.979 | 0.113 | 0.325 | 0.986 |
| 6 | Dos términos exponencial | $K = 0.007$; $K1 = 0.016$; $a = 0.425$; | 0.170 | 0.524 | 0.969 | 0.140 | 0.431 | 0.978 |
| 7 | Aproximación por difusión | $K = 0.48$; $a = 0$; $b = 0.029$; | 0.170 | 0.524 | 0.969 | 0.140 | 0.431 | 0.978 |
| 8 | Henderson y Pabis modificado | $K = 0.008$; $a = 1.084$; $b = 0$; | 0.139 | 0.427 | 0.979 | 0.113 | 0.325 | 0.986 |

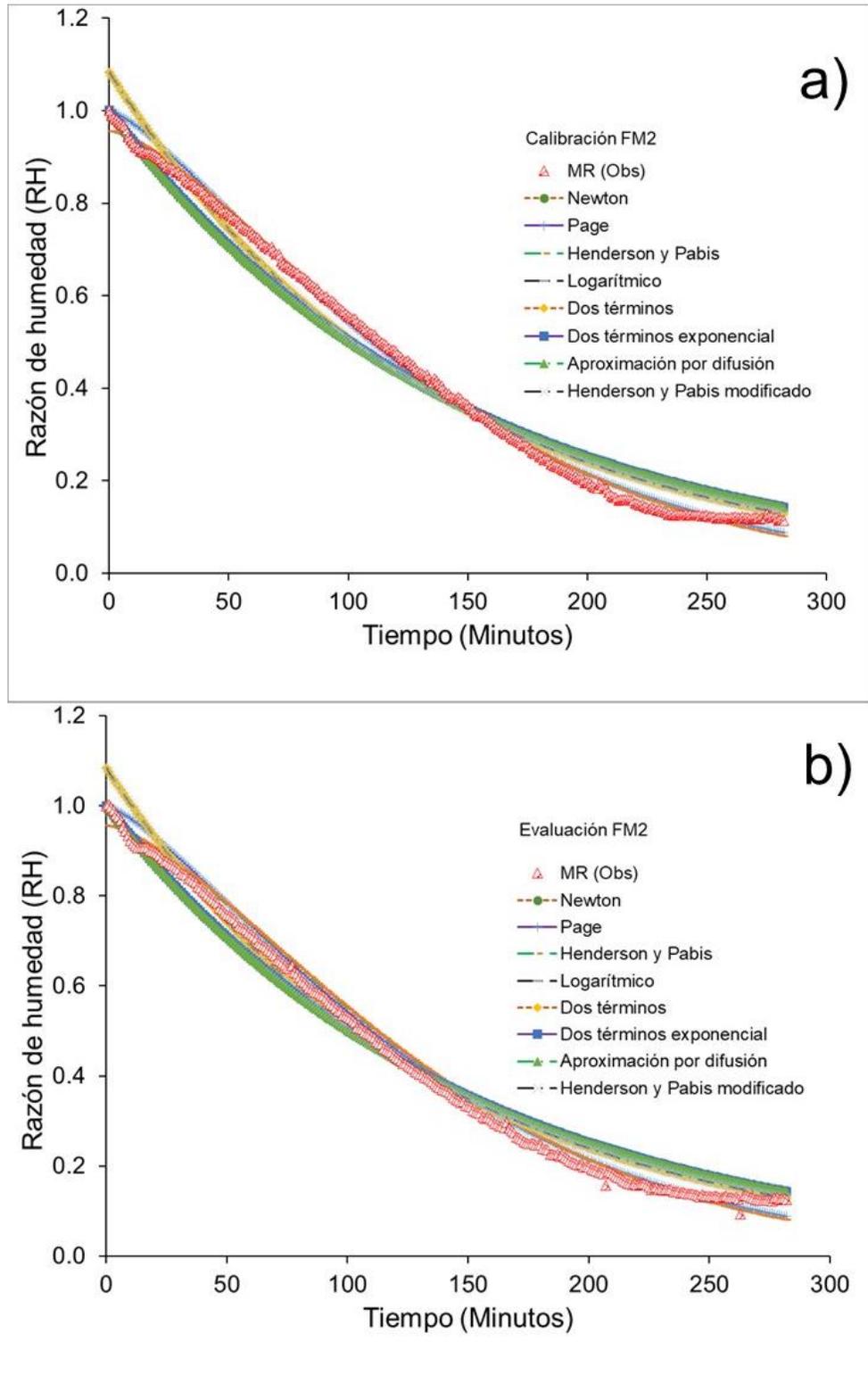


Figura 5. Razón de humedad (RH) de los datos de FM2 calibrados y evaluados en diferentes modelos matemáticos.

La EFF en la calibración del FM3 (Tabla 9) tuvo valores altos, pero disminuyeron en la evaluación. El RSME de todos los modelos aumentó al ser evaluados. Los valores globales indican que los modelos 2 y 3 son los que mejor se ajustan a los datos presentado los valores RSME < 0.028, y los de EFF > 0.91, por lo que predicen eficientemente la RH.

Tabla 9. Datos de la espuma Foam-Mat Drying (FM3), calibrados y evaluados a diferentes modelos matemáticos.

| Número | Modelos matemáticos | Coeficientes | Calibración | | | Evaluación | | |
|--------|------------------------------|--|-------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | | | RMSE | MAE | EFF | RMSE | MAE | EFF |
| 1 | Newton | K = 0.009; | 0.087 | 0.239 | 0.988 | 0.383 | 1.150 | 0.829 |
| 2 | Page | K = 0.006; n = 1.103; | 0.073 | 0.186 | 0.992 | 0.383 | 1.185 | 0.829 |
| 3 | Henderson y Pabis | K = 0.005; n = 1.112; a = 0.991; | 0.072 | 0.182 | 0.992 | 0.383 | 1.187 | 0.829 |
| 4 | Logarítmico | K = 0.009; a = 1.034; c = 0; | 0.080 | 0.222 | 0.990 | 0.383 | 1.165 | 0.829 |
| 5 | Dos términos | K = 0.009; K1 = 622.361; a = 1.034; b = 0; | 0.080 | 0.222 | 0.990 | 0.383 | 1.165 | 0.829 |
| 6 | Dos términos exponencial | K = 0.009; K1 = 0.018; a = 0.501; | 0.087 | 0.239 | 0.988 | 0.383 | 1.150 | 0.829 |
| 7 | Aproximación por difusión | K = 0.275; a = 0; b = 0.033; | 0.087 | 0.239 | 0.988 | 0.383 | 1.150 | 0.829 |
| 8 | Henderson y Pabis modificado | K = 0.009; a = 1.034; b = 0; | 0.080 | 0.222 | 0.990 | 0.383 | 1.165 | 0.829 |

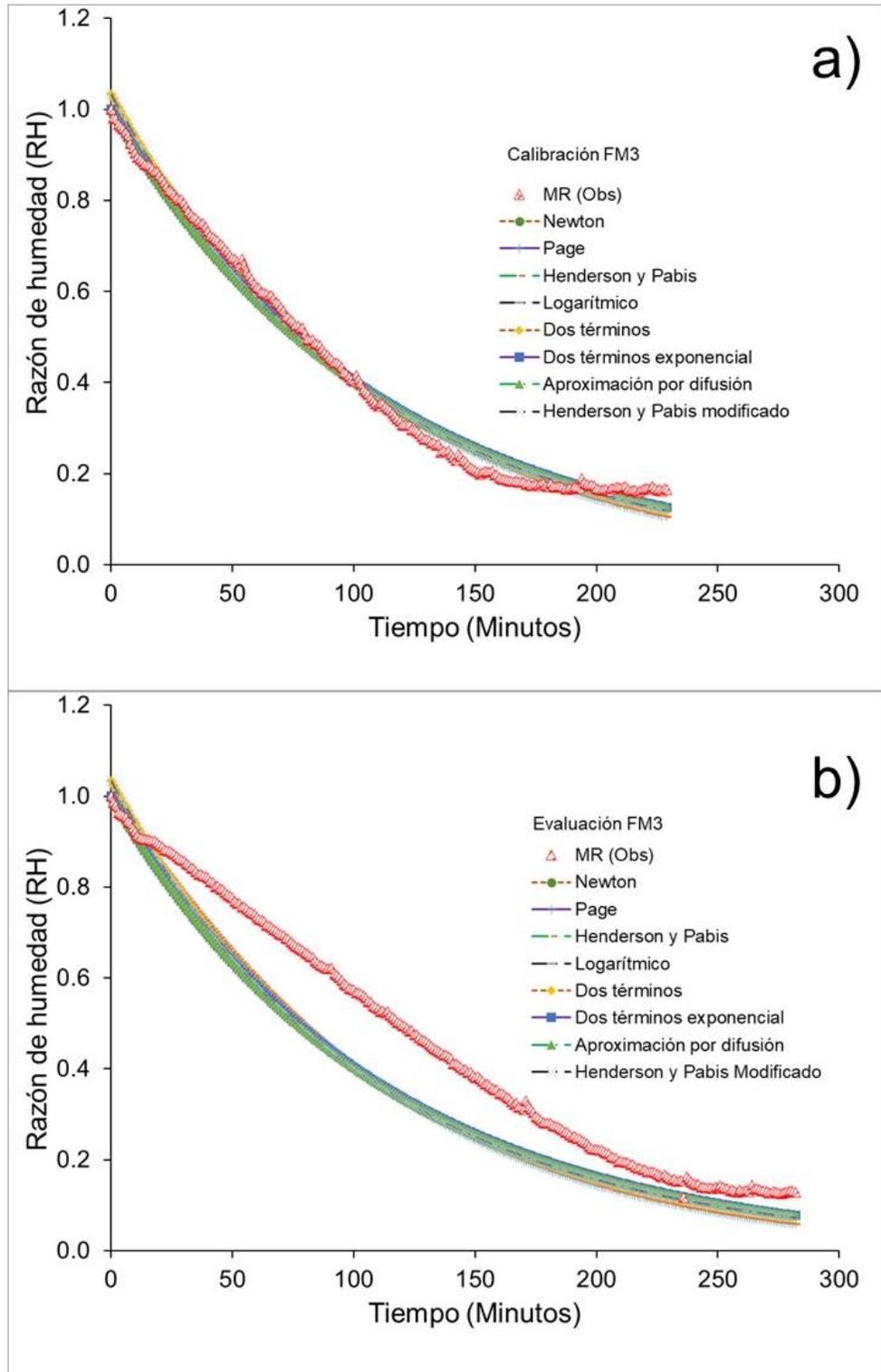


Figura 6. Razón de humedad (RH) de los datos de FM3 calibrados y evaluados en diferentes modelos matemáticos.

En el caso del FM4 (Tabla 10), se obtuvieron valores bajos de EFF y altos de RSME tanto en la calibración como en la evaluación. Los modelos 6 y 7 mostraron un mejor ajuste al disminuir el RSME < 0.130 y aumentar la EFF > 0.660 . Probablemente se deba a que se recabaron menos mediciones de la pérdida de peso durante el proceso de secado en comparación con el resto de los tratamientos.

Tabla 10. Datos de la espuma Foam-Mat Drying (FM4), calibrados y evaluados a diferentes modelos matemáticos.

| Número | Modelos matemáticos | Coeficientes | Calibración | | | Evaluación global | | |
|--------|------------------------------|--|-------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
| | | | RMSE | MAE | EFF | RMSE | MAE | EFF |
| 1 | Newton | $K = 0.007;$ | 0.146 | 0.081 | 0.691 | 0.149 | 0.140 | 0.628 |
| 2 | Page | $K = 0.001;$ $n = 1.374;$ | 0.126 | 0.088 | 0.603 | 0.160 | 0.141 | 0.575 |
| 3 | Henderson y Pabis | $K = 0.001; n = 1.499;$ $a = 0.955;$ | 0.129 | 0.092 | 0.588 | 0.162 | 0.148 | 0.563 |
| 4 | Logarítmico | $K = 0.008;$ $a = 1.093; c = 0;$ | 0.115 | 0.085 | 0.668 | 0.153 | 0.146 | 0.610 |
| 5 | Dos términos | $K = 0.008;$ $K1 = 622.361;$ $a = 1.093; b = 0;$ | 0.115 | 0.085 | 0.668 | 0.153 | 0.146 | 0.610 |
| 6 | Dos términos exponencial | $K = 0.007;$ $K1 = 0.016;$ $a = 0.435;$ | 0.111 | 0.081 | 0.691 | 0.149 | 0.140 | 0.628 |
| 7 | Aproximación por difusión | $K = 0.24;$ $a = 0; b = 0.029;$ | 0.111 | 0.081 | 0.691 | 0.149 | 0.140 | 0.628 |
| 8 | Henderson y Pabis modificado | $K = 0.008; a = 1.093;$ $b = 0;$ | 0.115 | 0.085 | 0.668 | 0.153 | 0.146 | 0.610 |

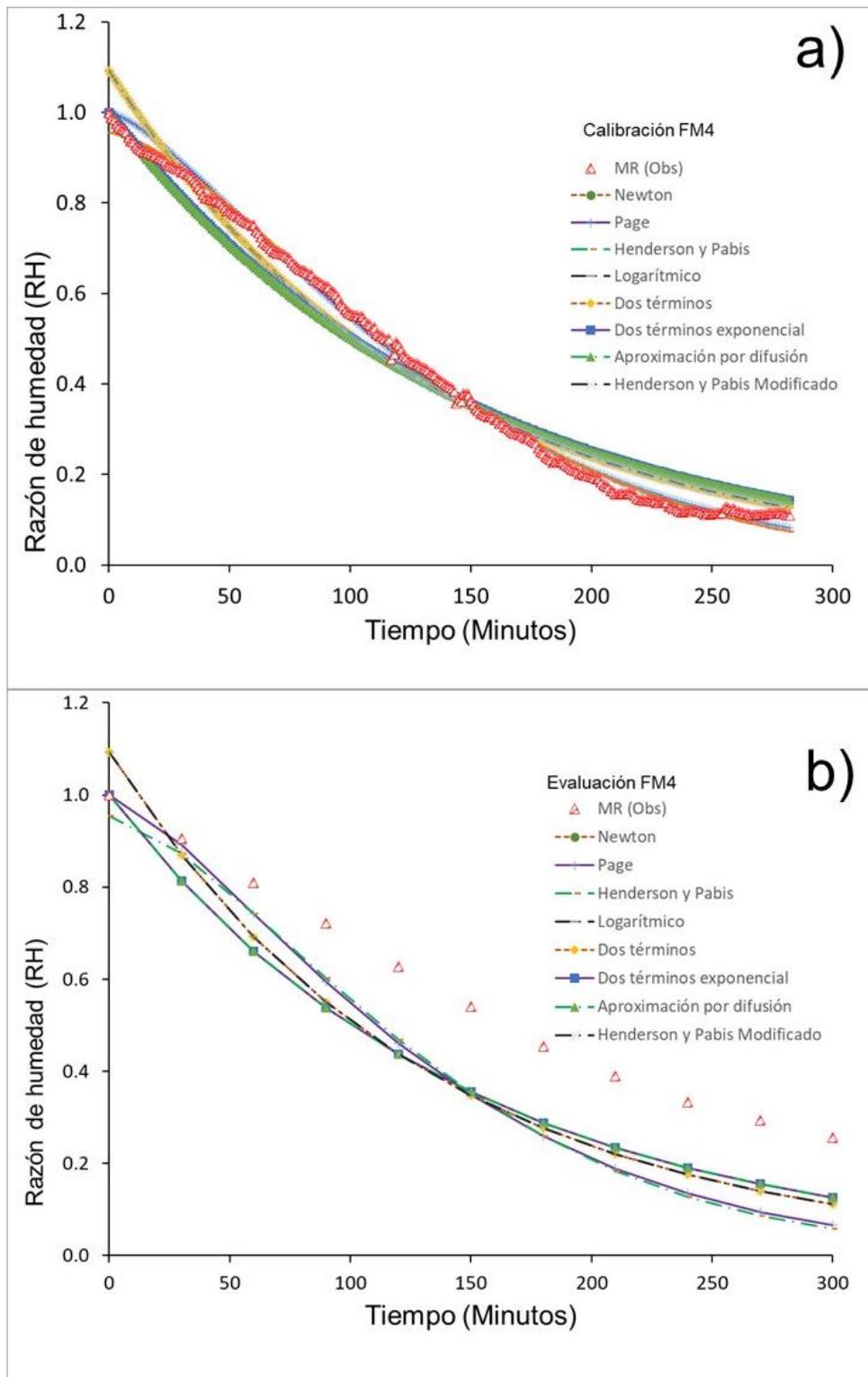


Figura 7. Razón de humedad (RH) de los datos de FM4 calibrados y evaluados en diferentes modelos matemáticos.

El factor proteína-almidón tiene impacto en la cinética de secado ya que su presencia en las pulpas hace que modelos distintos tengan un mejor ajuste con los datos experimentales. Los modelos de Page (2) y de Henderson y Pabis (3) fueron los que más coincidieron de los cuatro tratamientos.

Brar *et al.* (2020) reportó sobre la optimización del proceso de secado por FMD en espuma de durazno comparando la proteína de soya y guisantes (0.5, 1 y 1.5 %), observaron también que, debido a la pérdida del agua libre, la razón de humedad disminuyó rápidamente al inicio del proceso, pero conforme se eliminaba la mayor parte de esta agua libre, para dar paso al agua ligada. Ellos reportan que la proteína de guisante a 65 °C da polvos con mejores cualidades (color, contenido de fenoles y capacidad antioxidante) y que el modelo de Page (R^2 de 0.999 a 1) fue en el que mejor embonaban sus resultados. También señalan una proporción inversa entre la concentración de agentes espumantes, el incremento de la temperatura de secado y el grosor de la capa de espuma a deshidratar con el tiempo de secado. Suet *et al.* (2021) también reportan que el modelo de Page (R^2 superior a 0.9894) fue el modelo que mejor se ajustó a las razones de humedad en la espuma de melón al variar la cantidad de goma arábiga (0, 5, 10 y 15 % P/P) a una temperatura de 55 °C, señalando además que las constantes obtenidas de ese modelo pueden predecir el secado de la espuma de puré de melón.

Para Maciel *et al.* (2021), el modelo de Midili (R^2 mayor a 0.99) presentó el mejor ajuste de datos experimentales en el FMD de café al variar concentraciones de maltodextrina y proteína de suero. También mencionan que las curvas de secado permiten determinar el tiempo de secado, el contenido de agua evaporada y el consumo de energía térmica, posibilitando el ahorro de energía y exponer las características sensoriales, nutricionales y funcionales del alimento al calor.

7.3 Sólidos solubles totales (° Brix)

La pulpa de piña reportó valores de 11.18 ± 0.402 °Brix, son un poco mayores a los reportados por Castulovich y Franco, (2018) (8 ± 0.001 °Brix) quienes determinaron los análisis fisicoquímicos de un jugo mixto de piña y coco variando la cantidad de agentes estabilizadores en su formulación.

El factor proteína influye en las diferencias estadísticas ($p > 0.05$) de la cantidad de sólidos solubles totales (Tabla 7). Por lo que la concentración de proteínas tiene un efecto significativo durante el proceso de secado (FMD).

Se aprecia que los 4 tratamientos presentaron valores mucho menores de SST en comparación con los de la pulpa. Además, tuvieron diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) entre sí. FM1 (3.30 ± 0.2 °Brix) y FM2 (3.85 ± 1.01 °Brix) son iguales estadísticamente, pero inferiores a FM3 (4.23 ± 0.4 °Brix). FM3 (5.25 ± 1.5 °Brix) es estadísticamente a fin a FM3, pero mayor al resto de tratamientos, lo que indica que la presencia de proteína en los tratamientos aumenta la cantidad de SST en mayor medida de lo que lo hace el almidón.

Estos valores son menores a los reportados por Sharma *et al.* (2023) quienes encontraron valores de (9.78 ± 0.27 °Brix) en jugo de piña mezclado con maltodextrina y secado por aspersión variando la temperatura y velocidad de aire. Algo similar es reportado por Adetoro *et al.* (2020) al investigar las propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales del polvo de jugo de arándano liofilizado empleando maltodextrina, goma arábica y almidón ceroso, encontraron que el almidón proporcionaba menor rendimiento, menor solubilidad e higroscopicidad, esto lo atribuyen a la naturaleza cristalina de la maltodextrina y la goma arábica.

Por su parte Ramaswamy, *et al.* (2019) al estudiar los efectos de los SST y la presión en el puré de mango enriquecido con proteínas, señalan que la adición de proteínas en el puré aumenta la cantidad de sólidos en el medio y al mismo tiempo disminuye el contenido de humedad.

Wu *et al.* (2021) estudiaron los efectos de las altas presiones y el tratamiento térmico en jugo de piña, encontrando que el contenido de fructosa y glucosa disminuyó significativamente con el tratamiento térmico (95 °C/3 min). Eso lo atribuyen a la reacción de Maillard provocada por la temperatura en el jugo de la fruta.

Tabla 11. Valores promedio de los sólidos solubles totales en los polvos.

| Factor/Interacción | SST (°Brix) |
|-----------------------------------|------------------------|
| Concentración de proteína | |
| 1 | 4.74 a |
| 0 | 3.57 b |
| DMS | 0.8182 |
| Significancia (p > F) | 0.0075 |
| Concentración de almidón | |
| 1 | 4.55 a |
| 0 | 3.76 a |
| DMS | 0.8182 |
| Significancia (p > F) | 0.0596 |
| Interacción proteína x almidón | |
| | 0.5586 |
| FM1 | 3.30±0.2 b |
| FM2 | 3.85±1.01 b |
| FM3 | 4.23±0.4 ab |
| FM4 | 5.25±1.5 a |
| DMS | 1.1571 |
| Significancia (p > F) | 0.0157 |

*Por efecto principal e interacción, dentro de las columnas, los valores promedio con letras distintas son estadísticamente diferentes con base a la diferencia mínima (DMS) de la prueba de Fisher con $p \leq 0.05$.

7.4 Acidez titulable total y pH

La pulpa de la piña presentó valores de 3.03 ± 0.015 para el pH, y 1.085 ± 0.015 (% ác. Cítrico) de acidez titulable. Estos valores son cercanos a los reportados por Paz, (2015) quien reporta un de pH de 4.62 y acidez titulable de 0.933 en piña madura.

En la Tabla 8 se observa que los factores (proteína y almidón) no provocan diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) de pH entre los 4 tratamientos. Lo

que nos indica que la presencia de estos biopolímeros no tiene un efecto significativo en el deshidratado de espumas de piña.

El pH de los polvos aumentó con respecto al pH de la pulpa natural de piña madura. La acidez titulable también mostró un incremento en los polvos, además de que estos, si presentan diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) en ambos factores. El FM1 presentó los valores más altos de ATT (3.1 ± 0.1 % ác. cítrico), seguido del FM3 (2.86 ± 0.08 % ác. cítrico) que es estadísticamente inferior y por último dejando en niveles estadísticos iguales al FM2 (2.59 ± 0.2 % ác. cítrico) y FM4 (2.39 ± 0.2 % ác. cítrico). Lo que significa que la proteína (presente en FM2 y FM4) y el almidón (en FM3 y FM4) disminuyen la acidez titulable de los polvos.

Mandhava *et al.* (2020) reporta valores mayores de pH en polvos de jugo de piña obtenidos por secado por aspersión (pH entre 4.7 a 4.8) y liofilización (pH de 4.5 a 4.8). Pero reporta valores menores de ATT en porcentaje de ácido ascórbico en secado por aspersión (0.5 a 0.7%) y secado por liofilizado (0.6 a 1.1%), atribuyendo sus bajos valores a la presencia de maltodextrina agregada al jugo, ya que esta disminuyó la concentración de ácidos orgánicos.

Sango *et al.* (2019) comparó el efecto de secado en bandeja y secado solar con un pretratamiento osmótico en la obtención de polvos deshidratados de piña. Reportó valores menores de pH (3.47) y ATT (0.63%) en comparación de este trabajo. Además, afirma que la interacción entre los tratamientos para obtener el polvo y las condiciones de almacenamiento repercuten significativamente en los polvos, ya que el acceso de humedad y oxígeno deterioran por oxidación al ácido ascórbico durante el almacenamiento, por lo que recomienda resguardar el polvo en recipientes de vidrio.

Un factor clave que afecta las propiedades funcionales de la proteína de guisante son métodos de extracción y secado, ya que significa exponer a las proteínas a un entorno distinto (pH, temperatura o sales), lo que altera su estructura, composición y carga superficial, lo que también termina degradando las proteínas o alterando sus funciones e interacciones proteína-agua, proteína-proteína. El punto isoeléctrico de la proteína de guisante se encuentra en un intervalo de pH 4 y 5 (Legi *et al.*,

2020). Los valores de pH reportados en este trabajo se encuentran comprendidos en el intervalo del punto isoeléctrico de la proteína de guisante, esta podría ser la razón por la cual, el factor proteína no tuvo impacto en el pH de los polvos.

Tchouala *et al.* (2023) realizaron un estudio para formular una solución de recubrimiento de tomate a base de hoja de café, almidón y goma arábiga, ellos encontraron que la presencia de almidón no influyó significativamente en los valores de pH, pero atribuyen las tendencias crecientes de pH en frutas al aumento de la actividad de la glioxilasa en el ácido cítrico, por lo que el aumento del pH se debe a la pérdida de ácido cítrico por dicha actividad enzimática.

Bravo-Núñez *et al.* (2019) señalan que las mezclas de almidón-proteínas se pueden modificar por medio del pH, pero dependiendo de la combinación se puede presentar o no la dependencia del pH. Lo que afirma que es el pH el que altera la interacción proteína-almidón y no es la presencia de estos factores los que van a afectar el pH, por lo que es necesario investigar y experimentar las diferentes combinaciones de estos factores según lo requiera el caso.

Tabla 12. Valores promedio del pH y la acidez titulable en la pulpa y los polvos.

| Factor/Interacción | pH | ATT (% ác. Cítrico) |
|--------------------------------|-------------|--------------------------------|
| Concentración de proteína | | |
| 1 | 4.2417 a | 2.6308 b |
| 0 | 4.1745 a | 2.8151 a |
| DMS | 0.0995 | 0.137 |
| Significancia (p > F) | 0.1725 | 0.0109 |
| Concentración de almidón | | |
| 1 | 4.2208 a | 2.4638 b |
| 0 | 4.1950 a | 2.9822 a |
| DMS | 0.0995 | 0.137 |
| Significancia (p > F) | 0.5942 | <0.0001 |
| Interacción proteína x almidón | | |
| | 0.8227 | 0.4336 |
| FM1 | 4.16±0.1 a | 3.10±0.1 a |
| FM2 | 4.18±0.1 a | 2.59±0.2 c |
| FM3 | 4.22±0.06 a | 2.86±0.08 b |
| FM4 | 4.26±0.1 a | 2.39±0.2 c |
| DMS | 0.1407 | 0.1935 |
| Significancia (p > F) | 0.5178 | <0.0001 |

*Por efecto principal e interacción, dentro de las columnas, los valores promedio con letras distintas son estadísticamente diferentes con base a la diferencia mínima (DMS) de la prueba de Fisher con $p \leq 0.05$.

7.5 Colorimetría

La pulpa de la piña presentó valores de L^* 61.205 ± 2.69 a* 6.417 ± 1.49 y b^* 41.384 ± 3.39 . Estos datos son mayores a los de Rittisak *et al.* (2023) quienes reportan valores de L^* desde 52.62 ± 1.10 hasta 54.72 ± 0.96 , de a^* desde 1.06 ± 0.08 hasta 2.09 ± 0.29 y de b^* de 16.76 ± 0.64 a 21.67 ± 0.56 en una bebida de gelatina con diferentes concentraciones de pulpa de banano y piña.

En comparación con los polvos, la luminosidad aumentó en los polvos, al igual que el croma b^* , pero una disminución en el croma a^* . El análisis estadístico indicó que los factores proteína y almidón presentan diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) en las coordenadas L^* (disminuyendo su valor al estar presentes) y a^* (aumentando su valor al estar presentes), pero no en la coordenada b^* . Lo que significa que tanto la proteína de guisante como el almidón influyen en el cambio la luminosidad y de color (tonalidades de verde a rojo) durante el secado (FMD).

La luminosidad del FM1 ($77.54 \pm 4.5 L^*$) es estadísticamente mayor ($p > 0.05$) que FM2 ($69.05 \pm 2.07 L^*$), FM3 ($68.88 \pm 1.3 L^*$) y FM4 ($68.77 \pm 2.8 L^*$), los cuales son estadísticamente iguales entre ellos. Esto indica que la presencia de almidón y proteína reducen la luminosidad de los polvos.

Los tratamientos FM2 ($15.85 \pm 0.5 a^*$), FM3 ($16.07 \pm 0.5 a^*$) y FM4 ($15.97 \pm 0.5 a^*$) son estadísticamente iguales entre ellos, y mayores al FM1 ($12.93 \pm 1.7 a^*$) en la coordenada cromática a^* . Lo que indica que la presencia de los factores (almidón y proteína) incrementan la tonalidad rojiza en los polvos, durante el secado.

En la coordenada b^* el FM2 es estadísticamente mayor a FM1 (27.89 ± 2.2), FM3 (27.17 ± 1.1) y FM4 (27.77 ± 0.6), siendo FM1 y FM3 estadísticamente distintos pero afines a FM2 y dejando a FM4 (28.39 ± 0.5) en una categoría aparte. Quiere decir que la presencia de almidón incrementa la tonalidad amarilla más que la proteína en los polvos.

Los valores reportados en este trabajo con similares a los de Meena *et al.* (2022), quienes reportan valores cercanos de L^* (76.376 ± 0.04), menores de a^* (3.256 ± 0.02) y un poco mayores de b^* (30.356 ± 0.05) de cascara y fibra liofilizada de piña. Shaari *et al.* (2017) reporta valores mayores de L^* (de 74.17 ± 0.01 , hasta 90.44 ± 0.08), menores de a^* (de 3.13 ± 0.03 , hasta 6.18 ± 0.03) y similares de b^* (de 16.29 ± 0.23 hasta 26.7 ± 0.01) en polvos de jugo de piña secada por aspersión.

Chutia y Mahanta, (2021) estudiaron el efecto de la homogenización y el ultrasonido en nanopartículas de almidón y su capacidad de estabilizar la nanoemulsión de Pickering, encontrando variaciones de color (disminución del valor L^*) entre los

tratamientos y atribuyéndoselas al almidón. Rafiq, *et al.* (2019) evaluaron el efecto de diferentes técnicas de secado (composición química, color y actividad antioxidante) de la cáscara de kinnow, encontrando efectos significativos de la técnica de secado sobre la piel del fruto (disminuyó la luminosidad y aumento el valor a^*) después del secado atribuyéndolo a la reacción de Maillard (la cual afecta a proteínas y carbohidratos) durante este proceso.

La disminución de los valores de la coordenada b^* en la piña (oscurecimiento de la tonalidad amarilla) en la piña se debe a la degradación de carotenoides asimilados a la coloración amarilla por oxidación (Buitrago-Dueñas *et al.*, 2018).

Tabla 13. Valores promedio de las coordenadas L^* , a^* y b^* determinadas en los polvos.

| Factor/Interacción | L^* | a^* | b^* |
|--------------------------------|--------------|-------------|--------------|
| Concentración de proteína | | | |
| 1 | 68.83 b | 15.87 a | 28.08 a |
| 0 | 73.29 a | 14.39 b | 27.53 a |
| DMS | 1.8617 | 0.61 | 0.8238 |
| Significancia ($p > F$) | >0.0001 | >0.0001 | 0.1815 |
| Concentración de almidón | | | |
| 1 | 68.91 b | 15.73 a | 27.89 a |
| 0 | 73.21 a | 14.50 b | 27.83 a |
| DMS | 1.8677 | 0.61 | 0.8238 |
| Significancia ($p > F$) | >0.0001 | 0.0002 | 0.9114 |
| Interacción proteína x almidón | | | |
| | >0.0001 | >0.0001 | 0.1096 |
| FM1 | 77.54±4.5 a | 12.93±1.7 b | 27.89±2.2 ab |
| FM2 | 69.05±2.07 b | 15.85±0.5 a | 27.17±1.1 a |
| FM3 | 68.88±1.3 b | 16.07±0.5 a | 27.77±0.6 ab |
| FM4 | 68.77±2.8 b | 15.97±0.5 a | 28.39±0.5 b |
| DMS | 2.6414 | 0.8627 | 1.1651 |
| Significancia ($p > F$) | <0.0001 | <0.0001 | 0.2258 |

*Por efecto principal e interacción, dentro de las columnas, los valores promedio con letras distintas son estadísticamente diferentes con base a la diferencia mínima (DMS) de la prueba de Fisher con $p \leq 0.05$.

7.6 Índice de pardeamiento en polvos

El contenido de proteína y almidón en los polvos generó diferencias estadísticas significativas en la lectura de la absorbancia a 420 nm ($p > 0.05$) (Tabla 10), esto indica que tienen un efecto sobre el pardeamiento de los polvos.

El FM1 (0.1949 ± 0.009) es estadísticamente diferente ($p > 0.05$) y mayor que los demás tratamientos, le sigue FM4 (0.1697 ± 0.006) el cual también presentó diferencias estadísticas al resto de los tratamientos, pero menores al FM1. FM2 (0.1436 ± 0.2) y FM3 (0.153 ± 0.006) son estadísticamente iguales, pero inferiores a FM2, por lo tanto, también a FM1. Lo que significa que la presencia e interacción de los factores (proteína y almidón) disminuyen la lectura de la absorbancia (420 nm) de los polvos obtenidos por FMD.

Los valores reportados en este trabajo difieren de los de otros similares, por ejemplo Assawarachan y Noomhorm, (2010) al investigar los efectos de diferentes formas de secado (microondas al vacío, microondas y evaporación rotatoria al vacío) de jugo de piña en diferentes tiempos, reportan valores de índice de pardeamiento a una absorbancia de 420 nm para el secado al vacío en microondas de 0.2 a 0.6, en el caso del secado por microondas al vacío valores de 1.3 a 4, y en el caso de la evaporación por rotación al vacío de 1.5 a 2 aproximadamente. Ellos señalan que (gracias a otras investigaciones) se tienen referentes de que ocurren cambios en el color de los alimentos debido a los procesos térmicos (degradación de pigmentos, antocianinas y clorofila), oxidación de ácido ascórbico y la reacción de Maillard.

Por otra parte, Shibby *et al.* (2017) al evaluar el efecto de los materiales de almacenamiento en la estabilidad de almacenamiento del Lassi de piña reportan una absorbancia a 420 nm de 532, mucho mayor a los reportados en este trabajo. Khoozani *et al.* 2019 señalan que la cantidad de almidón y proteínas de los alimentos, junto con altas temperaturas pueden resultar en una reacción parcial de

Maillard. El almidón (azúcar no reductor) es un polisacárido conformado por estructuras cerradas que se valen de átomos libres para unirse entre sí, lo que provoca que tarde mucho más tiempo en degradarse (COMINTEC, 2023).

La reacción de glicosilación (pardeamiento no enzimático o de Maillard) es la condensación entre los grupos carbonilo del azúcar reductor y el grupo amino presentes en los alimentos. El grado de esta reacción en proteínas es potenciado si la proteína se encuentra desdoblada, ya que los azúcares se unen covalentemente a estas en una solución de pH bajo, lo que mejora la solubilidad y estabilidad de las proteínas) (Chen *et al.*, 2022). Cuando una proteína recibe calor en condiciones húmedas, su desnaturalización es más fácil, debido a que las moléculas de agua hinchan a la proteína y se aumenta su flexibilidad dinámica (Brishti *et al.*, 2020).

Tabla 14. Valores promedio de la absorbancia (420 nm) medidas en los polvos.

| Factor/Interacción | Pardeamiento Abs a 420 nm |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Concentración de proteína | |
| 1 | 0.1613 b |
| 0 | 0.1693 a |
| DMS | 0.0078 |
| Significancia ($p > F$) | 0.0410 |
| Concentración de almidón | |
| 1 | 0.1566 b |
| 0 | 0.1740 a |
| DMS | 0.0078 |
| Significancia ($p > F$) | >0.0001 |
| Interacción proteína x almidón | |
| | >0.0001 |
| FM1 | 0.1949±0.009 a |
| FM2 | 0.1436±0.2 c |
| FM3 | 0.153±0.006 c |
| FM4 | 0.1697±0.006 b |
| DMS | 2.0280 |
| Significancia ($p > F$) | 0.0408 |

*Por efecto principal e interacción, dentro de las columnas, los valores promedio con letras distintas son estadísticamente diferentes con base a la diferencia mínima (DMS) de la prueba de Fisher con $p \leq 0.05$.

7.7 Capacidad de absorción de agua, hinchamiento e índice de solubilidad en polvos

En la Tabla 11 se puede apreciar que los índices de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad de agua (ISA) no presentaron diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) con respecto a los factores presentes (almidón y proteína), por lo tanto, estos biopolímeros no presentan un efecto significativo en la

formulación y deshidratado de espumas (FMD) de piña. Meena *et al.* (2022) reportaron valores de 4.53 ± 0.25 g/g y 45.59 ± 1.94 % para IAA e ISA, respectivamente. Marquez *et al.* (2023) analizaron polvos de cáscara de piña comercial deshidratada en horno y reportan valores bajos de IAA (6.39 ± 0.07 g/g) e ISA (18.12 ± 0.98 mL/g), en comparación a los valores reportados en el presente trabajo. Himashree *et al.* (2022) evaluaron el polvo de la pulpa (sin corazón) al secarla en un deshidratador solar; reportando valores de IAA (515.5 ± 0.51 a 559 ± 0.00 %) e ISA (62.83 ± 0.28 a 64.83 ± 0.28 %) más altos que las espumas de piña deshidratadas en este trabajo.

Algunas propiedades tecnofuncionales como la gelificación, emulsificación y la formación de espumas dependen de la solubilidad y ésta, a su vez, depende de parámetros como la concentración del soluto, las características del solvente el pH y la temperatura (Bobade *et al.*, 2021). Asimismo, las propiedades tecnofuncionales en los alimentos son influenciadas por los componentes del alimento (carbohidratos, lípidos, proteínas, la humedad, el contenido de fibra, la cantidad de cenizas, y los aditivos agregados al alimento) y sus respectivas estructuras. Las cualidades de las proteínas repercuten en la formación de espuma, emulsificación y coagulación. Mientras que las cualidades del almidón afectan al pardeamiento, la gelificación, y la dextrinización en los alimentos (Awuchi *et al.*, 2019). Además, las proteínas retienen fuertemente el agua en su superficie, gracias a los grupos cargados en su superficie, pero hay factores tanto intrínsecos como extrínsecos (tipo de proteína, su estructura, la composición de sus aminoácidos, temperatura, pH y fuerza iónica) que alteran su capacidad de retener agua y de solubilizar (Bobade *et al.*, 2021).

La capacidad de hinchamiento (CH) presentó diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) en el factor relacionado a la concentración de almidón y en la interacción proteína y almidón. El FM1 presentó valores altos de CH (7.53 g/g) pero fue estadísticamente igual al FM3 (7.31 g/g) y FM4 (6.9 g/g). El FM2 fue estadísticamente diferente al FM1, además presentó menor CH (6.75 g/g) pero fue estadísticamente igual al FM3 y FM4, lo cual indica que la presencia de almidón en las espumas disminuye la capacidad de hinchamiento de los polvos. Esto puede ser

atribuido a que, a pesar de que los carbohidratos y las proteínas tienden a promover fuertes enlaces de hidrógeno gracias a la presencia de cadenas laterales polares, el granulado del almidón afecta en gran medida el comportamiento del hinchamiento por agua en los alimentos (Lapčíková *et al.*, 2021).

Meena *et al.* (2022) reportó valores de CH de 5.25 ± 0.14 g/g en polvos deshidratados obtenidos a partir de residuos de jugo de piña (cáscara y fibra). por los diferentes tratamientos son similares a los encontrados por los valores de CH en las espumas deshidratadas presentes en este trabajo fueron mayores a la CH reportada por Himashree *et al.* (2022), quienes presentaron una CH de 0.16 a 0.27 en polvos de piña.

Tabla 15. Valores promedio de los índices absorción de agua, solubilidad y capacidad de hinchamiento en los polvos.

| Factor/Interacción | IAA ($g_{H_2O}/g_{muestra}$) | ISA (%) | CH ($g_{H_2O}/g_{muestra}$) |
|--------------------------------|--|-------------------|---|
| Concentración de proteína | | | |
| 1 | 53.87 a | 6.11 a | 7.1089 a |
| 0 | 55.68 a | 5.76 a | 7.1079 a |
| DMS | 2.8956 | 1.0177 | 0.5134 |
| Significancia ($p > F$) | 0.2053 | 0.4753 | 0.9967 |
| Concentración de almidón | | | |
| 1 | 54.8944 a | 5.637 a | 6.820 b |
| 0 | 54.7397 a | 6.252 a | 7.424 a |
| DMS | 2.8956 | 1.0177 | 0.5134 |
| Significancia ($p > F$) | 0.9584 | 0.2312 | 0.0236 |
| Interacción proteína x almidón | | | |
| | 0.9164 | 0.4643 | 0.4604 |
| FM1 | 56.17 ± 4.8 a | 6.06 ± 1.8 a | 7.53 ± 0.9 a |
| FM2 | 55.26 ± 2.4 a | 5.51 ± 0.8 a | 6.75 ± 0.4 b |
| FM3 | 53.30 ± 2.2 a | 6.44 ± 0.7 a | 7.31 ± 0.2 ab |
| FM4 | 54.44 ± 2.3 a | 5.78 ± 0.5 a | 6.90 ± 0.1 ab |
| DMS | 4.1031 | 1.4421 | 0.7274 |
| Significancia ($p > F$) | 0.5288 | 0.5675 | 0.1194 |

*Por efecto principal e interacción, dentro de las columnas, los valores promedio con letras distintas son estadísticamente diferentes con base a la diferencia mínima (DMS) de la prueba de Fisher con $p \leq 0.05$.

7.8 Antocianinas totales

La pulpa de piña mostró una concentración de antocianinas de 1221.76 ± 285.5 mg/kg. Samreen *et al.* (2020) reportan 0.86 ± 0.05 mg/100 mL en jugo de piña madura natural, la diferencia entre concentraciones se puede deber a la forma de

preparación de la muestra. También se puede apreciar una disminución de la concentración de antocianinas en los polvos con respecto a la pulpa en la Tabla 12.

Los resultados del análisis estadístico señalan que los factores (proteína-almidón) provocaron diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) en la cantidad de antocianinas.

El FM2 (146.06 ± 11.1 mg de cianidina 3-glucósido/10 g de muestra), FM3 (142.24 ± 12.7 mg de cianidina 3-glucósido/10 g de muestra) y FM4 (137.6 ± 6.3 mg de cianidina 3-glucósido/10 g de muestra) presentaron los mayores valores de contenido de antocianinas. Por su parte, FM1 es estadísticamente inferior al resto de los tratamientos y presentó el valor más bajo (94.21 ± 7.3 mg de cianidina 3-glucósido/10 g de muestra). Esto indica que la presencia del almidón y proteína en el FMD evitan la pérdida de antocianinas en los polvos de piña.

Esta tendencia es muy similar a la vista en el índice de pardeamiento, y se puede atribuir a las mismas razones, ya que al verse entorpecida la reacción de Maillard por el secado térmico sobre los azúcares reductores (sacarosa y fructosa) de la piña por la presencia del almidón y la proteína, se evita la degradación de antocianinas.

Las antocianinas son compuestos fenólicos denominados flavonoides, estos se son los que le proporcionan colores (rojo, morado o azul) en frutas, hortalizas y flores, por esta razón son usados como colorantes alimentarios (Suravanichnirachorn *et al.*, 2018).

Otros autores como Rasheed *et al.* (2012) estudiaron los efectos del tipo de solvente, relación sólido-solvente, temperatura y tiempo de contacto en la extracción de compuestos fenólicos en cascara y pulpa de la piña. Ellos reportan mayor contenido de fenoles con respecto a los de este trabajo, encontrando, además, que una mayor cantidad de compuestos fenólicos en la cáscara de la piña (117.75 mg GAE/100 g FW con metanol 80% v/v en una relación sólido-disolvente de 1:20, a 35°C por de 90 min de contacto), que en el tayo (98.95 mg GAE/100 g FW) y la pulpa (63.07 mg GAE/100 g FW).

La biosíntesis de pigmentos (antocianinas, carotenoides y clorofilas) se reduce conforme avanza el estado de maduración en los frutos, por tanto, es la responsable del cambio de color (tonalidades rojo, morado, azul y amarillo) en la cáscara y tejidos de la fruta (Luan *et al.*, 2023).

Tabla 16. Valores promedio la concentración de antocianinas (mg de cianidina 3-glucósido/10 g de muestra) de los polvos.

| Factor/Interacción | Antocianinas mg/g |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Concentración de proteína | |
| 1 | 139.92 a |
| 0 | 120.14 b |
| DMS | 6.4617 |
| Significancia (p > F) | <0.0001 |
| Concentración de almidón | |
| 1 | 141.83 a |
| 0 | 118.23 b |
| DMS | 6.4617 |
| Significancia (p > F) | <0.0001 |
| Interacción proteína x almidón | |
| | <0.0001 |
| FM1 | 94.21±7.3 b |
| FM2 | 146.06±11.1 a |
| FM3 | 142.24±12.7 a |
| FM4 | 137.60±6.3 a |
| DMS | 9.1383 |
| Significancia (p > F) | <0.0001 |

*Por efecto principal e interacción, dentro de las columnas, los valores promedio con letras distintas son estadísticamente diferentes con base a la diferencia mínima (DMS) de la prueba de Fisher con $p \leq 0.05$.

7.9 Densidad de los polvos

Los resultados del análisis estadístico señalan que el factor proteína mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) en la densidad aparente y en la densidad compactada, por ende, influye también en el índice Carr y el de Hausner. El factor almidón, por otro lado, demostró diferencias estadísticas en la densidad aparente de los polvos. Por lo que se puede decir que los factores proteína-almidón influyen en la compactación y fluides de los polvos de piña obtenidos por FMD.

En la densidad aparente, hubo diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) entre los tratamientos, FM4 (0.452 ± 0.02) presentó la mayor densidad y fue estadísticamente distinto de los demás tratamientos, por lo que la interacción proteína-almidón tiene impacto en esta propiedad. En la densidad compactada no hubo diferencias estadísticas significativas entre ninguno de los tratamientos, lo que nos indica que ni las proteínas, ni el almidón tienen impacto en este parámetro.

La compresibilidad (índice Carr) de los polvos presentó diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$). El FM3 presentó los valores más bajos (1.238 ± 0.1) pero fue estadísticamente igual a FM4 (1.124 ± 0.08), ambos se clasifican con “buena” calidad. FM1 (1.321 ± 0.2) y FM2 (1.326 ± 0.04) son estadísticamente diferentes a FM3 y FM4, pero estadísticamente iguales entre ellos debido a sus valores se clasifican como “aceptables” en calidad.

La capacidad de flujo (índice Hausner) de los polvos tuvieron la misma tendencia solo que en esta el FM4 (10.73 ± 5.9) presentó menor valor, entrando así en la categoría de “excelente” seguido FM3 (18.75 ± 6.84) el cual es estadísticamente diferente, pero a fin a FM4, y categorizándose como “aceptable”. Por su parte FM1 (23.07 ± 10) y T2 (24.53 ± 2.73) son estadísticamente iguales entre ellos y presentaron los valores más grandes, lo que los cataloga como “aceptables”.

Ambas tendencias nos señalan que la presencia de proteína y almidón en los polvos de piña secados por FMD mejoran la calidad (compresibilidad y capacidad de flujo) en comparación con los tratamientos que carecen de ambos o solo tienen almidón agregado.

Los resultados de densidad aparente reportados en este trabajo fueron menores a los reportados por Shaari *et al.* (2017), quienes reportan valores desde 0.62 hasta 0.77 en este parámetro, en polvos de jugo de piña. También menores que los reportados por Sango *et al.* (2019) quienes reportan valores desde 0.675, hasta 0.712 en diferentes materiales de almacenamiento en polvos de pulpa (sin corazón) de piña.

Navarro-Flores *et al.* (2020) al evaluar el efecto de varios agentes encapsulantes en la microencapsulación de compuestos fenólicos durante el secado por aspersion atribuye las diferencias de densidad aparente de sus polvos obtenidos se debe al aumento del tamaño de las partículas (fruto de los diferentes tratamientos) y una mayor tendencia de las partículas a ser huecas por las condiciones de secado.

Zhao *et al.* (2020) estudiaron la funcionalidad de las proteínas de guisantes, arroz, soya y trigo, y encontraron que la proteína de trigo presentó mayor densidad aparente que el resto de las proteínas, rasgo que le atribuían a su mayor tamaño de partícula, probablemente esto le proporciona más espacio para retener aceite o agua. También señalan que, a menor densidad aparente, mayor volumen presentan los polvos con la misma cantidad de peso.

En la investigación de Mohgbeli *et al.* (2019) sobre el secado por aspersion de dátil (con polisorbato 80, pectina y proteína añadidas) encontró que las interacciones entre pectina, polisorbato y proteína afectaron la humedad y la densidad aparente de los polvos, señalando que probablemente se da al conveniente acomodo de las proteínas entre las partículas del polvo obtenido.

Una mayor densidad aparente significa una menor cantidad de aire presente en el polvo, lo que ayuda a disminuir la oxidación durante el almacenamiento. La densidad compactada afecta al envasado y transporte de los polvos, ya que indica el peso del polvo que puede contener en un contenedor (Mahdi *et al.*, 2019).

En el secado de frutas y hortalizas es mejor una baja densidad aparente para aumentar los aspectos sensoriales que conlleven a una mejor aceptación. Dicha

propiedad y la forma de las partículas se ve afectada por las condiciones de operación durante el proceso de secado (Calín-Sánchez *et al.*, 2020).

Tabla 17. Valores promedio de la densidad aparente y compactada y de los índices Carr y Haussner de los polvos.

| Factor/Interacción | Densidad aparente | Densidad compactada | Índice Carr | Índice de Haussner |
|--------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------------|
| Concentración de proteína | | | | |
| 1 | 0.41 a | 0.49 a | 1.18 b | 14.74 b |
| 0 | 0.35 b | 0.47 a | 1.32 a | 23.80 a |
| DMS | 0.0253 | 0.0447 | 0.1003 | 6.004 |
| Significancia (p > F) | <0.0001 | 0.31 | 0.0077 | 0.0051 |
| Concentración de almidón | | | | |
| 1 | 0.40 a | 0.48 a | 1.22 a | 17.63 a |
| 0 | 0.37 b | 0.47 a | 1.27 a | 20.91 a |
| DMS | 0.253 | 0.0447 | 0.1003 | 6.004 |
| Significancia (p > F) | 0.0243 | 0.5736 | 0.2752 | 0.2687 |
| Interacción proteína x almidón | | | | |
| | 0.0051 | 0.3545 | 0.2315 | 0.1155 |
| FM1 | 0.359±0.05 b | 0.474±0.08 a | 1.321±0.2 b | 23.07±10.42 b |
| FM2 | 0.351±0.01 b | 0.466±0.03 a | 1.326±0.04 b | 24.53±2.73 b |
| FM3 | 0.384±0.01 b | 0.476±0.04 a | 1.238±0.1 a | 18.75±6.84 ab |
| FM4 | 0.452±0.02 a | 0.508±0.04 a | 1.124±0.08 a | 10.73±5.9 a |
| DMS | 0.0358 | 0.0632 | 0.1418 | 8.4909 |
| Significancia (p > F) | <0.001 | 0.5241 | 0.0251 | 0.0128 |

*Por efecto principal e interacción, dentro de las columnas, los valores promedio con letras distintas son estadísticamente diferentes con base a la diferencia mínima (DMS) de la prueba de Fisher con $p \leq 0.05$.

8. Conclusiones

Con base a los resultados observados de las pruebas aplicadas a la espuma y los polvos se puede concluir lo siguiente:

Principalmente la proteína de guisante y el almidón aumentaron el porcentaje de expansión en la espuma formada con pulpa de piña madura.

El Foam-Mat Drying permite obtener polvos de pulpa de piña madura con bajo contenido de humedad, prolongando así su tiempo de vida útil y evitando que se convierta en un desecho alimentario.

Los modelos matemáticos de Page, y de Henderson y Pabis fueron los que más coincidieron y demostraron un mayor ajuste con los datos de razón de humedad observado de forma general.

Las interacciones de poliméricas proteína-almidón no influyeron en el pH, el índice de solubilidad, ni el de absorción de agua de los polvos obtenidos.

La proteína de guisante disminuyó el contenido de sólidos solubles totales de los polvos.

El almidón disminuye el índice de hinchamiento más de lo que lo hace la proteína de guisante en los polvos.

El contenido de proteína y almidón en los polvos disminuyen el porcentaje de acidez titulable en los polvos, siendo la proteína la que afecta más en este parámetro.

En cuanto al color, la proteína y el almidón presentes en los polvos disminuyen la luminosidad y aumentan las tonalidades rojizas, por su parte el almidón ayuda a mantener la tonalidad amarilla.

El índice de pardeamiento disminuyó y se presentó una mayor cantidad de antocianinas en los polvos con almidón y proteína en su formulación.

La presencia de los factores proteína-almidón en el proceso de deshidratado afectaron la densidad aparente de los polvos, pero no su compresibilidad. Además, de que principalmente la proteína de guisante tuvo un papel importante al mejorar la compresibilidad y la capacidad de flujo de los polvos, mejorando así su calidad.

9. Recomendaciones

Algunas investigaciones referenciadas en este trabajo señalan que las proteínas vegetales alcanzan una mejor estabilidad y mayor expansión de las espumas en comparación con las proteínas de origen animal, pero su efecto es notable al aumentar los tiempos de batido, probablemente esta variable impacte en la cinética de secado.

También se vería más enriquecido este trabajo si se indagara en otras combinaciones entre proteínas vegetales y diferentes tipos de almidón en diferentes concentraciones, ya que podría haber una interacción más favorable que las presentadas en este trabajo.

Otro punto que destacar es ajustar el pH de las pulpas, para que la proteína de guisante no se encuentre en su punto isoeléctrico y de esta forma poder observar si se alteran las propiedades tecnofuncionales más de lo que se observó en este trabajo.

10. Literatura citada

- Abdel-Aal, E. S., y Hucl, P. (1999). A Rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheats. *Cereal chemistry*, 76(3), 350-354. doi: 10.1094/CCHEM.1999.76.3.350
- Adetoro A. O., Opara U. L., y Fawole O. A. (2020). Effect of carrier agents on the physicochemical and technofunctional properties and antioxidant capacity of freeze-dried pomegranate juice (*Punica granatum*) powder. *Foods*, 9(10), 1388. <https://doi.org/10.3390/foods9101388>
- Andrés Mora C. (2019). Valoración in vitro del efecto de polvos ricos en compuestos bioactivos procedentes de subproductos de frutas sobre la microbiota intestinal de adultos. [Trabajo de grado licenciatura, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio digital. <http://hdl.handle.net/10251/126556>
- Arata D. H., Otero Nole, K., y Llamoca Domínguez, E. (2022). Estudio de los parámetros cinéticos en el secado de la cáscara de tuna (*Opuntia ficus indica*). *Revista de innovación y transferencia productiva*, 2(1), e005. <https://doi.org/10.54353/ritp.v2i1.e005>
- Arboleda Murillo A. N. (2020). Producción de bebida funcional en polvo a partir de residuos agroindustriales-semilla de aguacate y piel de uva *Vitis Labrusa*. [Tesis de grado licenciatura. Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio digital. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/37199>
- Arepally D., Ravula S., Malik G., y Kamidi, V. (2017). Mathematical modelling, energy and exergy analysis of tomato slices in a mixed mode natural convection solar dryer. *Chemical Science International Journal*, 20(4), 1-11. DOI:10.9734/CSJI/2017/34878
- Art ori-Dehghannya J., Pourahmad M., Ghanbarzadeh B., y Ghaffari H. (2019). Heat and mass transfer enhancement during foam-mat drying process of lime juice: Impact of convective hot air temperature. *International Journal of Thermal Sciences*, 135, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.023>

- Assawarachan R., y Noomhorm A. (2010). Changes in color and rheological behavior of pineapple concentrate through various evaporation methods. *International journal of agricultural and biological engineering*, 3(1), 74-84. DOI: 10.3965/j.issn.1934-6344.2010.01.074-084
- Awuchi C. G., Igwe V. S., y Echeta C. K. (2019). The functional properties of foods and flours. *International Journal of Advanced Academic Research*, 5(11), 139-160. <https://www.ijaar.org/articles/Volume5-Number11/Sciences-Technology-Engineering/ijaar-ste-v5n11-nov19-p16.pdf>
- Ayala-Zavala J., Vega-Vega V., Rosas-Domínguez C., Palafox-Carlos H., Villa-Rodríguez J. A., Siddiqui M. W., Dávila-Aviña J.E. y González-Aguilar, G. A. (2011). Agro-industrial potential of exotic fruit byproducts as a source of food additives. *Food Research International*, 44(7), 1866-1874. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.021>
- Azizpour, M., Mohebbi, M., y Khodaparast, M. H. H. (2016). Effects of foam-mat drying temperature on physico-chemical and microstructural properties of shrimp powder. *Innovative food science & emerging technologies*, 34, 122-126. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.002>
- Bas Bellver C. (2023). Desarrollo del proceso de obtención de polvos funcionales de uso alimentario a partir de residuos de las líneas de confección de hortalizas, caracterización funcional y evaluación de su respuesta a la digestión simulada in vitro [Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio digital. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/195107>
- Bobade H., Sharma S., y Singh B. (2021). Effect of ingredient interactions on techno-functional properties. *Food Formulation*, 71–99. doi:10.1002/9781119614760.ch5
- Brar A. S., Kaur P., Kaur G., Subramanian J., Kumar D., y Singh A. (2020). Optimization of Process Parameters for Foam-Mat Drying of Peaches. *International Journal of Fruit Science*, 1–24. doi:10.1080/15538362.2020.1812017

- Bravo Todd N. F. Y Raírez Rangel M. F. (2023). Aprovechamiento de bagazo de manzana (*Malus domestica*) [Tesis de grado licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio digital. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000837305/3/0837305.pdf>
- Bravo-Núñez Á., Garzón R., Rosell C. M., y Gómez M. (2019). Evaluation of starch–protein interactions as a function of pH. *Foods*, 8(5), 155. <https://doi.org/10.3390/foods8050155>
- Brennan J.A.E.V., Brennan James G., Butters J.R. y Cowell N.D. (1998). *Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos*. Tercera Edición. Acricbia. https://www.editorialacribia.com/libro/las-operaciones-de-la-ingenieria-de-los-alimentos_54043/
- Brishti F. H., Chay S. Y., Muhammad K., Ismail-Fitry M. R., Zarei M., Karthikeyan S., y Saari N. (2020). Effects of drying techniques on the physicochemical, functional, thermal, structural and rheological properties of mung bean (*Vigna radiata*) protein isolate powder. *Food Research International*, 138, 109783. doi:10.1016/j.foodres.2020.109783
- Buitrago-Dueñas E. L. K. I. N., Dussán-Sarria S., Rivera-Ochoa M. C., y Ordoñez-Santos L. E. (2018). Efecto del tipo de corte y tipo de envase en la conservación de piña *Ananas comosus* (L.) Merr. 'Oro Miel' mínimamente procesada. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(2), 308-318. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i2.7485>
- Cabanillas A., Nunez J., Cruz-Tirado J. P., Vejarano R., Tapia-Blácido D. R., Arteaga H., y Siche R. (2019). Pineapple shell fiber as reinforcement in cassava starch foam trays. *Polymers and Polymer Composites*, 27(8), 496-506. <https://doi.org/10.1177/0967391119848187>
- Calín-Sánchez Á., Lipan L., Cano-Lamadrid M., Kharaghani A., Masztalerz K., Carbonell-Barrachina Á. A., y Figiel A. (2020). Comparison of traditional and

novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs. *Foods*, 9(9), 1261. <https://doi.org/10.3390/foods9091261>

Cano-Chauca M., P.C. Stringheta, A.M. Ramo y J. Cal-Vidal. (2005). Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. Volume 6 (4). <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2005.05.003>.

Cardona Serrate F. (2020). Alteraciones enzimáticas en alimentos: el pardeamiento, el enranciamiento y la reacción de Maillard. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Tecnología de Alimentos <https://m.riunet.upv.es/handle/10251/147166>

Castulovich B., y Franco J. (2018). Efecto de agentes estabilizantes en jugo de piña (*Ananas comosus*) y coco (*cocos nucifera L.*) edulcorado. Panamá: Universidad Tecnológica de Panamá. DOI: <https://doi.org/10.33412/pri.v9.1.2063>

Chauhan A., Singh S., Dhar A., y Powar S. (2021). Optimization of pineapple drying based on energy consumption, nutrient retention, and drying time through multi-criteria decision-making. *Journal of Cleaner Production*, 292, 125913. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125913>

Cheftel, J., Cug, J., y Lorient, D. (1993). Amoniácidos, péptidos y proteínas. En *Química de los Alimentos* (págs. 275-414). Editorial Acribia.

Chen X., Dai Y., Huang Z., Zhao L., Du J., Li W., y Yu D. (2022). Effect of ultrasound on the glycosylation reaction of pea protein isolate–arabinose: Structure and emulsifying properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 89, 106157. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106157>

Chen, X., y Patel, K. (2008). Manufacturing better quality food powders from spray drying and subsequent treatments. *Drying Technology*, 26, 1313–1318. https://www.researchgate.net/publication/233321117_Manufacturing_Better_Quality_Food_Powders_from_Spray_Drying_and_Subsequent_Treatments

- Chutia H., y Mahanta C. L. (2021). Properties of starch nanoparticle obtained by ultrasonication and high pressure homogenization for developing carotenoids-enriched powder and Pickering nanoemulsion. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 74, 102822. doi:10.1016/j.ifset.2021.102822
- COMINTEC. (2023, 16 de noviembre). Azúcares Reductores y azúcares no reductores. comintec.com.mx. Consultado el 16 de noviembre del 2023. <https://www.comintec.com.mx/infomail/mailling36.php>
- Cordero Carrión, B. E. (2019). Elaboración de un deshidratado osmótico de pera (*pyrus communis L.*) enriquecido con suero lácteo utilizando tres temperaturas de secado [Tesis de grado licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio digital. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13500>
- Coronado Parra A. (2014). Maduración y comportamiento poscosecha de la guayaba (*Psidium guajava L.*) Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 8(2), 314-327. Revisado 05 de mayo del 2023, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2011-21732014000200013&lng=en&tlng=es
- Cruz Ponce S., Curbelo Hernandez C., y Reyes Sánchez J. M. (2023). Evaluación sensorial de compotas fortificadas con polvo y extracto de hojas secas de moringa (*Moringa oleifera*). *Peruvian Agricultural Research*, 4(2). <https://doi.org/10.51431/par.v4i2.785>
- Cuq, B., Gaiani, C., Turchiuli, C., Galet, L., Scher, J., Jeantet, R., Mandato, S., Petit, J., Murrieta-Pazos, I., Barkouti, A., Schuck, P., Rondet, E., Delalonde, M., Dumoulin, E., Delaplace, G., y Ruiz, T. (2013). Advances in food powder agglomeration engineering. *Advances in Food and Nutrition Research*, 69, 41–103. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410540-9.00002-8>
- De Luca R. (2022). Hacer frente a la pérdida y el desperdicio de alimentos: una oportunidad de ganar por partida triple. *Fao.org*. Consultado el 02 de

noviembre del 2023. <https://www.fao.org/newsroom/detail/FAO-UNEP-agriculture-environment-food-loss-waste-day-2022/es>

De Michelis, A. y Ohaco, E. (2015). Deshidratación y desecado de frutas, hortalizas y hongos. Procedimientos hogareños y comerciales de pequeña escala. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Revisado 20 de octubre del 2023, de <https://www.virtualpro.co/biblioteca/deshidratacion-y-desecado-de-frutas-hortalizas-y-hongos-procedimientos-hogarenos-y-comerciales-de-pequena-escala>

Díaz J. T., Foegeding E. A., Stapleton L., Kay C., Iorizzo M., Ferruzzi M. G., y Lila M. A. (2022). Foaming and sensory characteristics of protein-polyphenol particles in a food matrix. *Food Hydrocolloids*, 123, 107148. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107148>

Espinoza Gonzales, J. J. y Montiel Fernández, J. A. (2016). Fermentación en estado sólido de *Saccharum officinarum* con diferentes niveles de inclusión de follaje fresco de *Moringa oleifera* Managua, 2016. [Tesis de grado licenciatura, UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA]. Repositorio digital. <https://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/3353>

FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF. (2023). El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2023. Urbanización, transformación de los sistemas agroalimentarios y dietas saludables a lo largo del continuo rural-urbano. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc3017es>

FAO. (2002). Sistemas de calidad e inocuidad de los alimentos. Dirección de información de la FAO. 1era edición. https://www.google.com.mx/books/edition/Sistemas_de_Calidad_E_Inocuidad_de_Los_A/Rlrs8mdFTmwC?hl=es&gbpv=1&dq=formula+de+acidez+titulable+alimentos&pg=PP95&printsec=frontcover

FAO. (2019). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos. Roma. Licencia: CC BY-

- NC-SA 3.0 IGO. Consultado el 02 de octubre del 2023
<https://www.fao.org/3/ca6030es/ca6030es.pdf>
- FAO. (2023). Mercador y comercio. Consultado el 01/10/2023.
<https://www.fao.org/markets-and-trade/commodities/tropical-fruits/en/>
- FAO. (2023). Principales Frutas Tropicales. Análisis del mercado. *Resultados preliminares 2022*. Roma. <https://www.fao.org/3/cc3939es/cc3939es.pdf>
- Fayeza Hasan, Akmal Nazir, Bhawna Sobti, Hamza Tariq, Rehmat Karim, Ali H. Al-Marzouqi, y Afaf Kamal-Eldin. (2022). Dehydration of date fruit (*Pheonix dactylifera L.*) for the production of natural sweet powder. *NFS Journal* 27, 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2022.02.002>
- FEUM. (2016). Métodos generales de análisis. Norma oficial Mexicana NOM-001-SSA1-2010, 1-4. <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-mexico-americana-del-norte-ac/metodologia-de-la-investigacion/feum-dens-comp-determinacion-de-densidad/36762904>
- Figuroa Gonzalez J. J., Servin Palestina M. Zegbe A. J. y Martínez Ruiz A. (2022). Modelo de cinética de secado para rebanadas de guayaba con un deshidratador solar rústico. *Journal of Experimental Systems*. 9 (27). DOI: 10.35429/JOES.2022.27.9.9.13
- Fito Maupoey P., Andrés Grau A. M., Barat Baviera J. M. y Albors Sorolla A. M. (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. 1era edición. Editorial Universitat Politècnica de València. https://www.lalibreria.upv.es/portaEd/UpvGESTore/products/p_4092-2-1
- Forbes H., Quested T., O'Connor C. F. C., Mayienga S., Liu G., Parfitt J., Porpino G., Schneider F., Otto M., Ghafari D., Coppens L., Lomax J., Sfeir Jean-Pierre, Swannell R., Harris B., Gillick-Daniels S., y Parry A. (2021). Food waste index report 2021. ONU. <https://www.unep.org/es/resources/informe/indice-de-desperdicio-de-alimentos-2021>

Forbes. (2020). La CDMX desperdicia más de 13,000 toneladas de comida al día. Forbes.com.mx. Consultado el 02 de noviembre del 2023. <https://www.forbes.com.mx/noticias-la-cdmx-desperdicia-mas-de-13000-toneladas-de-comida-al-dia/>

Gramajo, M. G. P. (2017). Aplicación de los métodos de conservación de alimentos. Revista Ingeniería y Ciencia, 1(15). <https://core.ac.uk/download/pdf/228879718.pdf>

Hardy Z., y Jideani V. A. (2015). Foam-mat drying technology: A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 57(12), 2560–2572. doi:10.1080/10408398.2015.1020359

Hernández Rodríguez C. y Llamas Rodríguez J. F. (2020). Desperdicio de alimentos y tiempo disponible para trabajo doméstico. ¿Están correlacionados? Estudio exploratorio en un contexto urbano. Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional, 30(56), e201036. <https://doi.org/10.24836/es.30i56.1036>

Hossain, M. A., Mitra, S., Belal, M., y Zaman, W. (2021). Effect of foaming agent concentration and drying temperature on biochemical properties of foam mat dried tomato powder. Food Research, 5(2), 291-297 [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(1\).372](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(1).372)

Japa Paqui, L. E. (2022). Efectos de los métodos de deshidratación de frutas sobre sus propiedades nutricionales y sensoriales. [Tesis de grado licenciatura, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio digital. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/34929>

Jara Castrejón L. (2019). Elaboración de galletas con un edulcorante natural stevia (*Stevia rebaudiana Bertoni*) enriquecida con harina de cáscara deshidratada de piña (*Ananas comusus*). [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3402>
<http://190.116.36.86/handle/20.500.14074/3402>

Keromart. (s.f.) Piña Deshidratada. Keromart. Consultado el 03 de noviembre del 2023. <https://www.kero-mart.com/snacks/pina-deshidratada-50gr/>

Khamjae T., y Rojanakorn T. (2018). Foam-mat drying of passion fruit aril. *International Food Research Journal*, 25(1), 204-212. [http://ifrj.upm.edu.my/25%20\(01\)%202018/\(26\).pdf](http://ifrj.upm.edu.my/25%20(01)%202018/(26).pdf)

Khoozani A. A., Bekhit A. E.-D. A., y Birch J. (2019). Effects of different drying conditions on the starch content, thermal properties and some of the physicochemical parameters of whole green banana flour. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130, 938–946. doi:10.1016/j.ijbiomac.2019.03.010

Kneifel, W., Abert, T., y Richard, J. (1991). Water holding capacity of proteins with special regard to milk proteins and methodological aspects-A review. *Journal of Dairy Science*, 2027-2041. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78373-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78373-2)

Kneller C., Swannell R., Gillick S., Corallo A., Aguilar G., Alencastro S., Felix E. y Ashwini S. (2020). México marco conceptual para una estrategia nacional sobre la pérdida y el desperdicio de alimentos. Grupo del Banco Mundial. <https://wrap.org.uk/resources/report/conceptual-framework-national-strategy-food-loss-and-waste-mexico#:~:text=Food%20loss%20and%20waste%20in%20Mexico,-Building%20on%20work&text=The%20framework%20identifies%20the%20hotspots,help%20prevent%20and%20reduce%20FLW.>

Kumar, A., Kandasamy, P., Chakraborty, I., y Hangshing, L. (2022). Analysis of energy consumption, heat and mass transfer, drying kinetics and effective moisture diffusivity during foam-mat drying of mango in a convective hot-air dryer. *Biosystems Engineering*, 219, 85-102. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.04.026>.

Lapčíková B., Lapčík L., Valenta T., Majar P., y Ondroušková, K. (2021). Effect of the rice flour particle size and variety type on water holding capacity and water

diffusivity in aqueous dispersions. LWT, 142, 111082.
doi:10.1016/j.lwt.2021.111082

Leqi C., Nonoy B., Yechun W., Jae-Bom O., Bingcan C., y Jiajia R., (2020) Functionality and structure of yellow pea protein isolate as affected by cultivars and extraction pH. Food Hydrocolloids, 108, 106008.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106008>

López-Mejía N., Andrade-Mahecha M. M., y Martínez-Correa H. A. (2019). Modelamiento matemático de la cinética de secado de espagueti enriquecido con pulpa de zapallo deshidratada (*Cucurbita moschata*). Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica.
<https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1151>

López-Monterrubio, D.I., Lobato-Calleros, C., Alvarez-Ramirez, J. y Vernon-Carter, E.J., (2020). Huauzontle (*Chenopodium nuttalliae* Saff.) protein: Composition, structure, physicochemical and functional properties. Food Hydrocolloids. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106043>.

López-Quiroga E., Prosapio V., Fryer P. J., Norton I. T., y Bakalis, S. (2020). Model discrimination for drying and rehydration kinetics of freeze-dried tomatoes. Journal of Food Process Engineering, 43(5), e13192.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.13192>

Lourenço S. C., Campos D. A., Gómez-García R., Pintado M., Oliveira M. C., Santos D. I., y Alves, V. D. (2021). Optimization of natural antioxidants extraction from pineapple peel and their stabilization by spray drying. Foods, 10(6), 1255.
<https://doi.org/10.3390/foods10061255>

Luan A., Zhang W., Yang M., Zhong Z., Wu J., He Y., y He J. (2023). Unveiling the molecular mechanism involving anthocyanins in pineapple peel discoloration during fruit maturation. Food Chemistry, 412, 135482.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135482>

Maciel K. S., Teixeira L. J. Q., Lucia S. M. D., y Saraiva S. H. (2021). Optimization of foam mat drying for instant coffee processing and its effect on drying kinetics

and quality characteristics. *Drying Technology*, 1–15.
doi:10.1080/07373937.2021.1887210

Madhava M, Lakshmi Pasanna T, Srinivasa Rao A, Venkata Lakshmi V y Yagna Sree V. (2020) Process technology for production of spray and freeze dried pineapple powder. *Journal Pharmacogn Phytochem* 2020;9(2):766-771.
<https://www.phytojournal.com/archives/2020.v9.i2.10946/process-technology-for-production-of-spray-and-freeze-dried-pineapple-powder>

Mahdi A. A., Mohammed J. K., Al-Ansi W., Ghaleb A. D. S., Al-Maqtari Q. A., Ma M., Wang H. (2019). Microencapsulation of Fingered citron extract with gum arabic, modified starch, whey protein, and maltodextrin using spray drying. *International Journal of Biological Macromolecules*.
doi:10.1016/j.ijbiomac.2019.10.201

Maimunah Mohd A., Norhashila H., Samsuzana Abd A., y Ola L., (2020). Pineapple (*Ananas comosus*): A comprehensive review of nutritional values, volatile compounds, health benefits, and potential food products. *Food Research International*. Volume 137. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109675>

Manisha J. P., Himashree Animesh S. S., y Sunil C.K. (2022). Valorization of food industry by-product (pineapple pomace): A study to evaluate its effect on physicochemical and textural properties of developed cookies. *Measurement: Food*, 6, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2022.100031>

Marín B. E., Lemus M. R., Flores M. V. y Vega G. A. (2006). La Rehidratación de alimentos deshidratados. *Revista chilena de nutrición*, 33(3), 527-538.
<https://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182006000500009>

Marquez Molina, O., J. A. Domínguez-Avila, L. X. Lopez-Martínez, S. Pareek, T. J. Madera Santana, and G. A. González Aguilar. "Valorization of Tropical Fruit Peel Powders: Physicochemical Composition, Techno-Functional Properties, and in Vitro Antioxidant and Antidiabetic Activities". 2023. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, vol. 35, no. 6, May 2023,

doi:10.9755/ejfa.2023.v35.i6.3105.

<https://www.ejfa.me/index.php/journal/article/view/3105>

Martín Herrero A. (2022). Propiedades físicas, funcionales y químicas de harina obtenida a partir de semillas de amaranto [Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio digital. <http://hdl.handle.net/10251/185390>

Martinez Montes, M., y Solano de la Cruz, N. (2022). Calidad física y microbiológica de la leche cruda que se expende en la ciudad de Huancavelica. [Tesis de licenciatura. Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio digital. <https://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/5062>

Medina B., M. L., y Pagano G., F. (2003). Caracterización de la pulpa de guayaba (*Psidium guajava* L.) tipo "Criolla Roja". Revista de la Facultad de Agronomía, 20(1), 72-86. Recuperado en 27 de abril de 2023, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182003000100008&lng=es&tlng=es.

Meena L., Neog R., Yashini M., y Sunil C. K. (2022). Pineapple pomace powder (freeze-dried): Effect on the texture and rheological properties of set-type yogurt. Food Chemistry Advances, 1, 100101. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772753X22000892>

Mendoza-Corvis, F. A, Arteaga M, Margarita, y Pérez S. O. (2016). Comportamiento de la vitamina C en un producto a base de lactosuero y pulpa de mango variedad Magdalena River (Mangífera Indica/.) durante el secado por aspersion. Revista chilena de nutrición, 43(2), 159-166. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182016000200008>

Mercer G. Donald. (2014). An introduction to the dehydration and drying of fruits and vegetables. [manuscrito presentado para publicación]. Department of food Science, University of Guelph, Ontario, Canada. Pp. 3-1 a 3-5

Mettler Toledo. (s.f.). Medición de la acidez en los alimentos. Consultado el 27 de agosto del 2023.

<https://www.mt.com/mx/es/home/applications/laboratory/food-and-beverages/acidity-measurement.html>

Moghbeli S., Jafari S. M., Maghsoudlou Y., y Dehnad D. (2019). A Taguchi approach optimization of date powder production by spray drying with the aid of whey protein-pectin complexes. *Powder Technology*. doi:10.1016/j.powtec.2019.10.013

Mohan, N. y Mellem, J.J. (2020). Functional properties of the protein isolates of hyacinth bean [*Lablab purpureus (L.) Sweet*]: An effect of the used procedures. *LWT-Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109572>.

Molina O. M., Domínguez-Avila J. A., Lopez-Martínez L. X., Pareek S., Santana T. J. M., y Aguilar, G. A. G. (2023). Valorization of tropical fruit peel powders: Physicochemical composition, techno-functional properties, and in vitro antioxidant and antidiabetic activities. *Emirates Journal of Food and Agriculture*. doi:10.9755/ejfa.2023.v35.i6.3105.

Morales Guzmán Y. (2021). Valoración del residuo agroindustrial de la piña (*Ananas comosus*) para la obtención de productos biotecnológicos. [Tesina de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.] Repositorio digital. <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/2718>

Navarro-Flores M. J., Ventura-Canseco L. M. C., Meza-Gordillo R., Ayora-Talavera T. del R., y Abud-Archila M. (2020). Spray drying encapsulation of a native plant extract rich in phenolic compounds with combinations of maltodextrin and non-conventional wall materials. *Journal of Food Science and Technology*. doi:10.1007/s13197-020-04447-w

Noriega Verdugo D. (2023). Determinación del valor nutricional de un complemento alimenticio desarrollado a partir del polvo obtenido de guanábana deshidratada. [Tesis de maestría. Universidad Estatal de Milagro]. Repositorio digital. <http://repositorio.unemi.edu.ec/xmlui/handle/123456789/7019>

Ortega Ibarra E., Hernández Ramírez G., y Ortega Ibarra I. H. (2021). Composición nutricional y compuestos fitoquímicos de la piña (*Ananas comosus*) y su potencial emergente para el desarrollo de alimentos funcionales. Boletín De Ciencias Agropecuarias Del ICAP, 7(14), 24-28. <https://doi.org/10.29057/icap.v7i14.7232>

Paz Cedeño M. F. (2015). Determinación del contenido de fibra dietética en dos variedades de piña (*Golden Sweet* y *Ananás Comosus*) considerando el estado fisiológico y las condiciones agroecológicas [Tesis de grado licenciatura, Quevedo: UTEQ]. Repositorio digital. <http://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/302>

Peralta Olivo, A. S. (2020). "Composición química de la piña (*Ananas comosus*) y los subproductos a nivel de campo como materia prima alternativa para la producción animal" [Tesis de grado licenciatura. Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. Repositorio digital. <http://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/5289>

Pincirolli, M. (2010). Proteínas de Arroz: Propiedades estructurales y funcionales. [Disertación doctoral, Universidad Nacional de la Plata]. Repositorio digital. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/1828>

Pinterest. (s.f.). Piña deshidratada. Pinterest. Consultado el 03 de noviembre del 2013. <https://www.pinterest.es/pin/607634174744246994/>

Pomeranz, Y. (1991). Functional properties of food components. San Diego: Academic Press Inc. [https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=AfRrg_EkMc&oi=fnd&pg=PP1&dq=Pomeranz,+Y.+\(1991\).+Functional+Properties+of+Food+Components.+San+Diego:+Academic+Press+Inc.&ots=a9_ANHKprE&sig=nUcz71ueEU2Rernkk2XM4cyCU4U#v=onepage&q=Pomeranz%2C%20Y.%20\(1991\).%20Functional%20Properties%20of%20Food%20Components.%20San%20Diego%3A%20Academic%20Press%20Inc.&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=AfRrg_EkMc&oi=fnd&pg=PP1&dq=Pomeranz,+Y.+(1991).+Functional+Properties+of+Food+Components.+San+Diego:+Academic+Press+Inc.&ots=a9_ANHKprE&sig=nUcz71ueEU2Rernkk2XM4cyCU4U#v=onepage&q=Pomeranz%2C%20Y.%20(1991).%20Functional%20Properties%20of%20Food%20Components.%20San%20Diego%3A%20Academic%20Press%20Inc.&f=false) [Consultado el día 28 de marzo del 2023]

PROFECO. (2022). Evita el desperdicio de alimentos. Gobierno de México. Consultado el 02 de octubre del 2023. <https://www.gob.mx/profeco/documentos/evita-el-desperdicio-de-alimentos>

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, (2020). Los ODS en acción. Consultado el 02 de noviembre del 2023. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals/10/12/2020>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2022) Índice de desperdicios de alimentos 2021. Consultado el 02 de noviembre del 2023. <https://www.unep.org/es/resources/informe/indice-de-desperdicio-de-alimentos-2021>

Rafiq S., Singh B., y Gat Y. (2019). Effect of different drying techniques on chemical composition, color and antioxidant properties of kinnow (*Citrus reticulata*) peel. Journal of Food Science and Technology. doi:10.1007/s13197-019-03722-9

Ramaswamy H. S., y Gundurao A. (2019). Effect of soluble solids and high pressure treatment on rheological properties of protein enriched mango puree. Foods, 8(1), 39. <https://doi.org/10.3390/foods8010039>.

Ramírez A., y de Delahaye E. P. (2011). Composición química y compuestos bioactivos presentes en pulpas de piña, guayaba y guanábana. Interciencia, 36(1), 71-75. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33917727011.pdf>

Ramírez, J., Cortés, M., y Hincapié, C. A. (2019). Optimización del proceso de liofilización y comparación con el secado por convección de estragón ruso (*Artemisia dracunculus L.*). Acta Agronómica, 68(3), 167-174. <https://www.redalyc.org/journal/1699/169965183002/169965183002.pdf>

Rasheed A. A., Cobham E. I., Zeighmami M., y Ong S. (2012, June). Extraction of phenolic compounds from pineapple fruit. In Proceedings of the 2nd International Symposium on Processing & Drying of Foods, Fruits & Vegetables, Kuala Lumpur, Malaysia (pp. 8-19). https://www.researchgate.net/profile/Adamu-Rasheed/publication/306033959_EXTRACTION_OF_PHENOLIC_COMPOU

NDS_FROM_PINEAPPLE_FRUIT/links/57abc8e108ae0932c97173e3/EXTRACTION-OF-PHENOLIC-COMPOUNDS-FROM-PINEAPPLE-FRUIT.pdf

Real Academia Española. (2022). Ananás. Sitio <https://dle.rae.es/anan%C3%A1s#15vlgzR>

Reza Kamali, Saeed Dadashi, Jalal Dehghannya y Hossein Ghaffari. (2022). Numerical simulation and experimental investigation of foam-mat drying for producing banana powder as influenced by foam thickness. Applied Food Research. Volume 2. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100075>

Rittisak S., Lonuch N., Buakeeree S., y Yimtoe S. (2023). Development of jelly drink from cultivated banana pseudo stem juice (*Musa sapientum L.*) and pineapple juice supplemented with pineapple pulp. Food Research, 7(2), 52-59. DOI: [https://doi.org/10.26656/fr.2017.7\(2\).721](https://doi.org/10.26656/fr.2017.7(2).721)

Rivera Y., Guevara B., y Diaz C. (2019). Evaluación fisicoquímica, nutricional y microbiológica en banano (*Cavendish Valery*) deshidratado por Liofilización, Ventana de Refractancia y Convección forzada. Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales. 6(1), 95-102. <https://revistas.sena.edu.co/index.php/recia/article/view/2032>

Rosas Flores, J. A. (2011). Evolución del consumo y gasto económico de energía en el sector residencial (urbano-rural) mexicano 1996-2006. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/4642>

Rubiano-Charry, K.D., Ciro-Velásquez, H.J., y Aristizabal-Torres, I.D. (2019). Aprovechamiento de los subproductos del mango, como fuente de compuestos bioactivos, para la elaboración de rollos comestibles. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 22(2):e1078. <http://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1078>

Ruili Gao, Liangliang Xue, Yuhan Zhang, Yicheng Liu, Liuyang Shen, y Xianzhe Zheng. (2022). Production of blueberry pulp powder by microwave-assisted foam-mat drying: Effects of formulations of foaming agents on drying

characteristics and physicochemical properties. LWT. Volume 154. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112811>.

Saad A. D. Sifat,¹ Anuva T. Trisha, Nurul Huda , Wahidu Zaman , y Norliza Julmohammad. (2021). Response surface approach to optimize the conditions of foam mat drying of plum in relation to the physical-chemical and antioxidant properties of plum powder. Hindawi International Journal of Food Science. Volume 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/3681807>

Sáenz Herrera P. del R. (2015). “Caracterización tecno-funcional del extracto proteico del salvado de arroz”. [Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica Del Litoral]. Repositorio digital. <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/02d9c649-66ae-402b-a5be-739c3f74cb28/D-CD88201.pdf>

Salas Murillo O. (2018). Desechos de la piña: un dolor de cabeza para productores. Universidad de Costa Rica. Con el ojo sobre la piña. Consultado el 02 de noviembre del 2023. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/06/21/desechos-de-la-pina-un-dolor-de-cabeza-para-productores.html>

Salazar Llorente, E. J., Arias Toro, D., Villalta García, G. K., y Tamayo Rendon, E. A. (2022). Determinación del contenido nutricional de harina de banano aplicando el proceso de deshidratación. Journal of Science and Research, 7(CININGEC II), 11–27. <https://revistas.utb.edu.ec/index.php/sr/article/view/2833>

Salazar Ramirez E. (2020). Modelado de la cinética de secado por convección forzada de la semilla de pajuero (*Erythrina edulis Triana*). [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio digital. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/1823>

Samreen C. V., Edukondalu L., Beera V., y Rao V. S. (2020). Physicochemical characteristics of pomegranate and pineapple juice. Indian J Ecol, 43, 60-3. https://www.researchgate.net/profile/Vimala-Beera/publication/348835633_Physicochemical_Characteristics_of_Pomegra

nate_and_Pineapple_Juice/links/6100f981169a1a0103bfa64e/Physicochemical-Characteristics-of-Pomegranate-and-Pineapple-Juice.pdf

Sánchez C. (2023, 09 de enero). Red BANMX. Consultado el 02 de noviembre del 2023. <https://bamx.org.mx/conmemoraciones/dia-internacional-para-la-concienciacion-sobre-perdida-y-desperdicio-de-alimentos/>

Sangamithra A., Sivakumar V., John S. G., y Kannan K. (2015). Foam mat drying of food materials: A review. *Journal of food processing and preservation*, 39(6), 3165-3174. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20153438278>

Sango Lule V., Mukesh Kumar G. y Kanika P. (2019). Effect of different drying techniques on the quality attributes of pineapple powder. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(2), 324-341. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.802.038>

Santamaría López K. J. (2018). Formulación y caracterización de un sistema de liberación gastroflotante de tabletas clorhidrato de metformina basado en efervescencia e hinchamiento [Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio digital. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/16149>

Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación. (2017). Planeación agrícola Nacional 2017 – 2030. *Piña Mexicana*. SAGARPA. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257084/Potencial-Pi_a.pdf

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Crece 16.2% producción de piña en México durante 2020. SADER. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crece-16-2-produccion-de-pina-en-mexico-durante-2020?idiom=es>

Seerangurayar T., Manickavasagan A., Abdulrahim M. Al-Ismaili, Yaseen A. y Al-Mulla. (2017). Effect of carrier agents on flowability and microstructural properties of foam-mat freeze dried date powder. *Journal of Food Engineering*. doi:10.1016/j.jfoodeng.2017.07.016

- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2014). Piña, reina de las frutas tropicales. SIAP. <https://www.gob.mx/siap/articulos/pina-reina-de-las-frutas-tropicales?idiom=es>
- Shaari N. A., Sulaiman, R., Rahman R. A., y Bakar J. (2017). Production of pineapple fruit (*Ananas comosus*) powder using foam mat drying: Effect of whipping time and egg albumen concentration. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(2), e13467. doi:10.1111/jfpp.13467
- Sharma R., Nath P. C., y Seth, D. (2023). Optimization of spray-drying conditions using response surface methodology, physico-chemical characterization and shelf-life estimation of pineapple powder. *Sustainable Food Technology*, 1(5), 750-761. <https://doi.org/10.1039/D3FB00008G>
- Sharma, A., Chen, C.R. y Lan, N.V. (2009). Solar Energy Drying Systems: A Review. *Renewable & Sustainable Energy*, 13, 1185-1210. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.015>
- Shiby V. K., Jayashree V., Sanchita, S., y Pandey M. C. (2017). Effect of packaging materials and storage on quality attributes of freeze dried pineapple Lassi powder for defence applications. *Defence Life Sci. J*, 2(2), 193-198. DOI : 10.14429/dlsj.2.11366
- Shivani, Chahat Thakur, Anil Kumar Verma y Preeti Chaudhary. (2021). Foam mat drying of papaya and guava pulp. *The Pharma Innovation Journal* 2021; 10(8): 78-82. <https://www.thepharmajournal.com/archives/2021/vol10issue8/PartB/10-9-349-140.pdf>
- SIAP [@SIAP_MX]. (2023 09 de mayo). El cultivo de #piña tiene una participación de 5.3% en la producción nacional de frutos. [Post]. https://twitter.com/SIAP_Mx/status/1656056454212730888
- SIAP. (2023). Avance de Siembras y Cosechas. [Siap.gob.mx](https://siap.gob.mx). Consultado el 03 de noviembre del 2023. https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/

- Statista. (2021). Consumo anual per cápita de algunas frutas en México en 2021, por tipo (en kilogramos). Statista.com. Consultado el 02 de noviembre del 2023. <https://es.statista.com/estadisticas/592164/consumo-anual-percapita-de-las-principales-frutas-en-mexico/>
- Suarez Hernandez L., Barrera Zapata R. y Forero Sandoval A. F. (2016). Evaluation of alternative drying techniques for the earthworm flour processing. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria*, Mosquera (Colombia), 17(1):55-71. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0122-87062016000100006&script=sci_arttext
- Suet Li T., Sulaiman R., Rukayadi Y., y Ramli S. (2021). Effect of gum Arabic concentrations on foam properties, drying kinetics and physicochemical properties of foam mat drying of cantaloupe. *Food Hydrocolloids*, 116, 106492. doi:10.1016/j.foodhyd.2020.106492
- Sun G. M., Zhang X. M., Soler A., y Marie-Alphonsine P. A. (2016). Nutritional composition of pineapple (*Ananas comosus (L.) Merr.*). In *Nutritional composition of fruit cultivars* (pp. 609-637). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408117-8.00025-8>.
- Suravanichnirachorn W., Haruthaithanasan V., Suwonsichon S., Sukatta U., Maneeboon T., y Chantrapornchai, W. (2018). Effect of carrier type and concentration on the properties, anthocyanins and antioxidant activity of freeze-dried mao [*Antidesma bunius (L.) Spreng*] powders. *Agriculture and Natural Resources*, 52(4), 354-360. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2018.09.011>
- Tchouala Tazo, F. L., Kanmegne G., Ngotio Tchinda A., Kenfack O. J., y Tafré Phounzong E. (2023). Optimization of edible coating formulation using response surface methodology for delaying the ripening and preserving tomato (*Solanum lycopersicum*) fruits. *Journal of Food Quality*, 2023, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2023/7710980>

- Thuwapanichayanan R., Prachayawarakorn S., y Soponronnarit S. (2012). Effects of foaming agents and foam density on drying characteristics and textural property of banana foams. *LWT - Food Science and Technology*, 47(2), 348–357. doi:10.1016/j.lwt.2012.01.030
- Tipaz Villarreal M. Y. (2023). Determinación del mejor método de deshidratado en hojuelas de remolacha (*Beta vulgaris*) para la adición a un yogurt. [Tesis de grado licenciatura, Universidad Politécnica Estatal del Carchi] Repositorio digital. <http://181.198.77.137:8080/jspui/handle/123456789/1950>
- Urfalino D. P., Worlock J., Daniele J. M. (2020). Aplicación de microondas para la elaboración de ciruelas deshidratadas descarozadas sin conservantes. [Informe técnico]. EEA Rama Caída, INTA. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/12084>
- Valencia Muñiz V. E., Díaz Santiago A., Bricio Barrios J. A., Bricio Barrios E. E., Fonseca Palacios A. J., Moreno Peña J. R., y García Solórzano L. A. (2023). Análisis de las ventajas de prototipos de secadores solares para la deshidratación de alimentos de origen vegetal. *INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO REVISTA DIGITAL* Volumen 15(2). https://www.researchgate.net/publication/371292348_Volumen_15_-_Numero_2_Abril_-_Junio_2023_INNOVACION_Y_DESARROLLO_TECNOLOGICO_REVISTA_DIGITAL_Analisis_de_lasventajas_de_prototipos_de_secadores_solares_para_la_deshidratacion_de_alimentos_de_origen_veg
- Vargas, M., Figueroa Brito, H., Tamayo Cortez, J., Toledo López, V., y Moo Huchin, V. (2019). Aprovechamiento de cáscaras de frutas: análisis nutricional y compuestos bioactivos. *CIENCIA Ergo-Sum*, 26(2). <https://doi:10.30878/ces.v26n2a6>
- Velásquez Carbo R. DE J. y Zambrano Zamora E. A. (2022). Estudio comparativo de los compuestos fitoquímicos y la actividad antioxidante entre la cáscara fresca y deshidratada del *Cucumis melo L.* (MELÓN). [Tesis de licenciatura,

Universidad de Guayaquil]. Repositorio institucional.
<http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/65587>

Watharkar R. B., Chakraborty S., Srivastav P. P., y Srivastava B. (2021). Foaming and foam mat drying characteristics of ripe banana [*Musa balbisiana* (BB)] pulp. *Journal of Food Process Engineering*, 44(8), e13726.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.13726>

Wu W., Xiao G., Yu Y., Xu Y., Wu J., Peng J., y Li L. (2021). Effects of high pressure and thermal processing on quality properties and volatile compounds of pineapple fruit juice. *Food Control*, 130, 108293.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108293>

Zamora Gómez, L. L., y Loredó Treviño, A. (2020). Importancia del melón (*Cucumis melo*) y técnicas para su conservación. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, 14(24). <http://www.biochemtech.uadec.mx/wp-content/uploads/2022/01/1-JBCT-2020-001.pdf>

Zayas, J. (1997). *Functionality of proteins in food*. New York: springer-verlag berlin heidelberg. <https://www.semanticscholar.org/paper/Functionality-of-Proteins-in-Food-Zayas/c9cd659a9a13cb8e5c167cd09869c7f20fae7f92>

Zhao H., Shen C., Wu Z., Zhang Z., y Xu C. (2020). Comparison of wheat, soybean, rice, and pea protein properties for effective applications in food products. *Journal of Food Biochemistry*. doi:10.1111/jfbc.13157

11. Anexos

11.1 Sólidos solubles totales (° Brix)

Se tomó muestras de la pulpa de piña obtenida y con ayuda de una espátula, se tomó una pequeña alícuota para proceder a registrar la lectura de los ° Brix en el refractómetro digital tipo paleta (marca Atago, modelo PR-101 Alfa, hecho en Japón).

11.2 Acidez titulable

Para la determinación de acidez titulable de la pulpa, se pesaron 2.5 g de esta (al natural y con su respectivo tratamiento en cada muestra), para posteriormente ser agitada con 10 mL de agua destilada. La muestra molida se filtró con ayuda de tela tul, para después añadir otros 50 mL de agua destilada al sobrenadante. La acidez titulable de las diferentes pulpas fue medida con hidróxido de sodio al 0.1 N y ayuda del Titulador automático (marca Mettler Toledo, modelo T50, hecho en Japón). Para la determinación de la acidez titulable (% ácido cítrico) se empleó la ecuación 14 (FAO, 2002).

$$Ec. 14: \% \text{ acidez} = \frac{N * V * Meq (0.064)}{P} * 100$$

Donde:

N = normalidad del NaOH

V = mL de solución de NaOH gastados

Meq = miliequivalentes de ác. Cítrico (0.064)

P = peso de la muestra

11.3 pH

El pH se midió con el Titulador automático, ya que cuenta con un potenciómetro integrado, con el cual se registró la medición de pH antes de comenzar a titular.

11.4 Colorimetría de la pulpa

La colorimetría se midió a través de 5 puntos (por triplicado) en la superficie de la fruta sin cáscara. Una vez molida la pulpa, se tomaron muestras de esta y se colocaron en cajas Petri, para tomar lectura del color con ayuda del espectrofotómetro de esfera SP60 (marca X-rite, modelo SP60, obtenido a través de <https://xritemexico.com.mx/>).

11.5 Antocianinas totales

La concentración de antocianinas se determinó en base a la metodología descrita por Abdel-Aal y Hucl (1999). Esta técnica consistió en colocar dentro de tubos Falcon de 50 mL, 50 mg de muestra seca, posteriormente se le añadió 24 mL de etanol acidificado (etanol:HCl 1N 85:15) y se agitó a 8000 rpm por 30 minutos para extraer los compuestos.

Después se ajustó el pH de la muestra a 1 con HCl (4 N) y se midió el pH con el potenciómetro (marca OHAUS, modelo ST2100, echo U.S.A.). Una vez realizada esta tarea, la muestra se centrifugó a 4400 rpm por 15 min a temperatura ambiente, para posteriormente decantar el sobrenadante en matraces de aforo de 50 mL y se procedió a aforar la muestra nuevamente con etanol acidificado. Una vez aforada la muestra, se agitó manualmente de forma vigorosa (unas 30 veces aproximadamente), y se finalizó colocando 250 μ L en las multiceldas para tomar la lectura de la absorbancia a 535 nm en el espectrofotómetro de luz UV-Vis. Para calcular el contenido de antocianinas se empleó la ecuación 15 (Abdel-Aal y Hucl, 1999).

$$Ec. 15: C = \left(\frac{A}{\varepsilon}\right) * \left(\frac{vol}{1000}\right) * PM * \left(\frac{1}{P}\right) * 10^6$$

Donde:

$C =$ Antocianinas totales $\left(\frac{mg}{Kg}\right)$

$A =$ Absorbancia media a 535 nm

$\varepsilon =$ Absorbancia molar de cianidina 3-glucosido $(25.965 \text{ cm}^{-1} \text{ M}^{-1})$

$Vol =$ Volumen total del extracto de antocianinas (50 mL)

$PM =$ Peso molecular de cianidina 3-glucosido (449 g/mol)

$P =$ Peso inicial de la muestra



Figura 8. Espuma antes y después del secado.



Figura 9. Molienda manual de las hojuelas obtenidas del tapete de espuma.



Figura 10. Cambio de color en la titulación de pulpa.



Figura 11. Valores promedio de la acidez titulable en las pulpas y los polvos tratados.

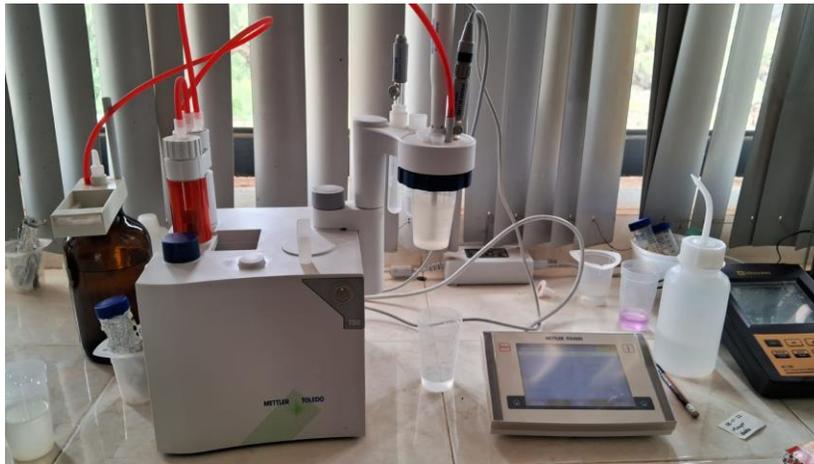


Figura 12. Equipo de titulación Mettler Toledo.



Figura 13. Multiceldas en la placa del espectrofotómetro UV-Vis.

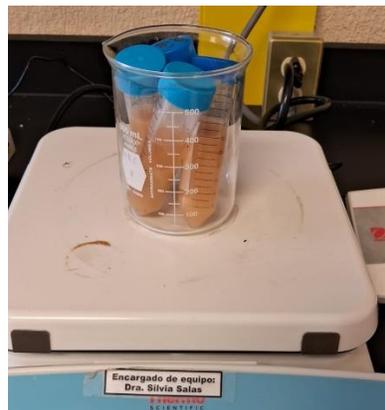


Figura 14. Tubos Falcon en agitación.



Figura 15. Centrifugación de los tubos Falcon.

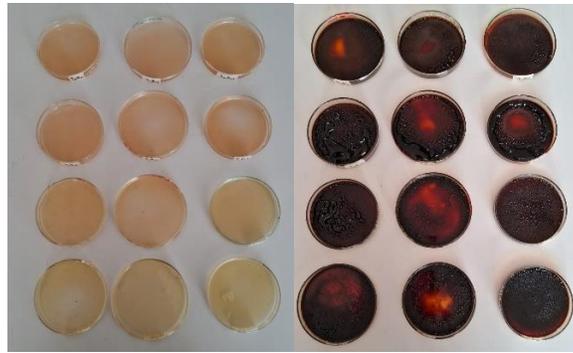


Figura 16. Decantación en cajas Petri y posterior secado.



Figura 17. Agitación de los tubos Falcon.



Figura 18. Pulpa y espuma de piña.



Figura 19. Ensayo de estabilidad de espuma montado.



Figura 20. Separación de la fase acuosa de la espuma durante el experimento.



Figura 21. Ensayo de densidad y compactación de los polvos.