



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

“Estudio de los cambios estructurales y funcionales de una mezcla de proteína de chícharo (*Pisum sativum*), harina de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) y avena (*Avena sativa*) texturizada por extrusión con alta humedad”

TESIS DE MAESTRÍA

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

PRESENTA

I.AL. CLAUDIO GONZÁLEZ GALEANA

DIRIGIDO POR

DRA. SANDRA OLIMPIA MENDOZA DÍAZ

CENTRO UNIVERSITARIO, QUERÉTARO, QRO.

JULIO DE 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Estudio de los cambios estructurales y funcionales de una mezcla de proteína de chícharo (*Pisum sativum*), harina de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) y avena (*Avena sativa*) texturizada por extrusión con alta humedad

por

Claudio González Galeana

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: FQMAC-309120



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

Facultad de Química

Maestría en Ciencias y Tecnología de Alimentos

Tesis de maestría

“Estudio de los cambios estructurales y funcionales de una mezcla de proteína de chícharo (*Pisum sativum*), harina de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) y avena (*Avena sativa*) texturizada por extrusión con alta humedad”

Como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencia y Tecnología de los Alimentos

Presenta

I.AL. Claudio González Galeana

Dirigido por

Dra. Sandra Olimpia Mendoza Díaz

Dra. Sandra Olimpia Mendoza Díaz
Director

Dra. Marcela Gaytán Martínez
Secretario

Dra. Rocio Campos Vega
Vocal

Dra. Ma. Estela Vázquez Barrios
Suplente

M.C. Adolfo Castañeda Salazar
Suplente

Dra. Silvia Lorena Amaya Llano
Directora de la Facultad de Química

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Agosto de 2023

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Queretaro por su apoyo y patrocinio para el presente proyecto titulado : Estudio de los cambios estructurales y funcionales de una mezcla de proteína de chícharo (*Pisum sativum*), harina de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) y avena (*Avena sativa*) texturizada por extrusión con alta humedad.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis padres por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, tanto en los momentos felices como en los difíciles. Siempre me han brindado la fuerza y la determinación necesarias para seguir adelante en cualquier circunstancia. No importa cuánto tiempo pase, mi gratitud hacia ellos permanecerá inalterable.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi pareja, quien ha sido mi constante apoyo a lo largo de este período de estudios, sosteniéndome en los momentos más difíciles y guiándome cuando me sentía perdido en el camino.

Agradezco sinceramente a la Dra. Sandra Olimpia Mendoza Díaz por su inquebrantable paciencia y apoyo a lo largo de la realización del presente proyecto. Su orientación y sabios consejos han sido fundamentales durante estos dos años de arduo trabajo.

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD DE ESTUDIANTE

Declaro que los datos propios obtenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética y que reporto detalles necesarios para que los resultados de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras. Finalmente, este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y dio reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento.

I.AL. Gonzalez Galeana Claudio

I. RESUMEN

Se ha demostrado un descenso en el consumo de proteína animal, así como la aparición de un grupo que busca productos de origen no animal. En este estudio, se caracterizó y desarrollo un producto texturizado mediante extrusión con alta humedad a base de amaranto, proteína de chícharo y avena. Se determinaron el índice de absorción de agua (IAA) el índice de solubilidad en agua (ISA) y la capacidad de absorción de aceite (CAA) de las muestras extrudidas para identificar las condiciones óptimas el proceso. Se llevó a cabo un análisis SEM, DSC, análisis de textura y color. El proceso de extrusión bajo los parámetros de 135 °C a 35 rpm con un contenido de humedad del 60% produjo un extrudido con valores de 3.2 ± 0.2 g H₂O/g muestra, $8.6 \pm 0.1\%$ y 1.4 g aceite/ g muestra para IAA, ISA y CAA, respectivamente. El análisis SEM reveló que las microfibras en el extrudido estaban orientadas en una sola dirección, favoreciendo la formación de microfibras, como en el caso de una red anisotrópica. El análisis DSC revelo que las temperaturas de desnaturalización del producto extrudido eran más bajas, lo que indica que las proteínas experimentaron cambios estructurales que favorecieron la formación de estructuras más pequeñas y agregados de proteínas. Se realizó un análisis de interacciones proteínas-proteínas. Revelando que más del 55% de las interacciones observadas en el extrudido corresponden a enlaces disulfuro entre proteínas. Los resultados obtenidos muestran el desarrollo de un texturizado vegetal mediante la tecnología de extrusión con alta humedad con propiedades funcionales mejoradas.

Palabras clave: proteína de amaranto, proteína de chícharo, extrusión con alta humedad, análogos de carne, proteínas vegetales

II. ABSTRACT

A decline in animal protein consumption has been demonstrated, alongside the emergence of a group seeking non-animal origin products. In this study, a textured product was characterized and developed using high-moisture extrusion technology, based on amaranth, pea protein, and oats. The water absorption index (WAI), water solubility index (WSI), and oil absorption capacity (OAC) of the extruded samples were determined to identify optimal process conditions. SEM, DSC, texture analysis, and color assessment were conducted. The extrusion process under parameters of 135°C at 35 rpm with a moisture content of 60% yielded an extrudate with values of 3.2 ± 0.2 g H₂O/g sample, $8.6 \pm 0.1\%$, and 1.4 g oil/g sample for WAI, WSI, and OAC, respectively. SEM analysis revealed that microfibers in the extrudate were oriented in a single direction, promoting microfiber formation, akin to an anisotropic network. DSC analysis indicated lower denaturation temperatures for the extruded product, suggesting structural changes in proteins that favored smaller structures and protein aggregates. Protein-protein interaction analysis was conducted, revealing that over 55% of interactions observed in the extrudate corresponded to disulfide bonds between proteins. The results obtained demonstrate the development of a plant-based textured product using high-moisture extrusion technology with enhanced functional properties.

Key Words: Amaranth protein, pea protein, high-moisture extrusion, meat analogs, plant proteins.

ÍNDICE

I. RESUMEN	IV
II. ABSTRACT	V
ÍNDICE	VI
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
III. INTRODUCCIÓN	1
IV. ANTECEDENTES	3
1. Generalidades del amaranto, chícharo y avena.	8
1.1. <i>Amaranto.</i>	8
1.1.1. Origen.	8
1.1.2. Proteínas.	8
1.1.3. Los lípidos.	10
1.1.4. El almidón.	11
1.2. <i>Chícharo.</i>	12
1.2.1. Origen del chícharo.	12
1.2.2. Proteínas.	13
1.3. <i>Avena.</i>	15
1.3.1. Origen de la avena.	15
1.3.2. Valor nutritivo.	16
1.3.3. Contenido de fibra en la avena.	18
2. Técnica de extrusión.	3
3. Proteínas vegetales texturizadas (PVT).	18
3.1. <i>Efecto de la extrusión sobre proteínas vegetales.</i>	19
3.2. <i>Efecto de la extrusión sobre las grasas.</i>	21
3.3. <i>Efecto de la extrusión sobre el almidón.</i>	21
V. JUSTIFICACIÓN	23
VI. HIPÓTESIS	24
VII. OBJETIVOS	24
<i>Objetivo general</i>	24
	VII

<i>Objetivos específicos</i>	24
VIII. MATERIALES Y MÉTODOS	25
1. <i>Materia prima.</i>	25
1.1. <i>Caracterización química de las materias primas.</i>	25
1.2. <i>Electroforesis desnaturizante (SDS-PAGE).</i>	27
2. <i>Determinación de las variables de operación para la extrusión.</i>	28
2.1. <i>Acondicionamiento de materia prima.</i>	28
2.2. <i>Diseño de experimento para la extrusión.</i>	29
3. <i>Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y funcionales de mezcla texturizada.</i>	30
3.1. <i>Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de la mezcla texturizada.</i>	30
3.2. <i>Determinación de las interacciones intermoleculares.</i>	32
3.3. <i>Microscopía electrónica de barrido.</i>	33
4. <i>Análisis estadístico</i>	33
IX. RESULTADOS Y DISCUSIONES	33
1. <i>Composición proximal de las harinas.</i>	33
2. <i>Variables de respuesta del proceso de extrusión.</i>	36
3. <i>Resultados de la evaluación de las propiedades fisicoquímicas y funcionales de mezcla texturizada</i>	41
1. <i>Índice de solubilidad en agua (ISA).</i>	41
2. <i>Índice de absorción de agua (IAA).</i>	44
3. <i>Capacidad de absorción de aceite (CAC).</i>	45
4. <i>Potencial de hinchamiento (PH).</i>	46
5. <i>Coefficiente de expansión (E).</i>	47
6. <i>Interacciones intermoleculares entre proteínas.</i>	49
7. <i>Electroforesis desnaturizante SDS-PAGE.</i>	52
8. <i>Análisis térmico por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).</i>	54
9. <i>Morfología por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).</i>	57
10. <i>Análisis de textura.</i>	58
11. <i>Análisis de color.</i>	59
12. <i>Análisis proximal de la proteína texturizada.</i>	61
13. <i>Análisis de aminoácidos (aa).</i>	62
X. CONCLUSIONES	65
XI. BIBLIOGRAFÍA	66

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: CONTENIDO DE AMINOÁCIDOS EN HARINAS DE <i>A. HYPOCHONDRIACUS</i> CRUDO EN G/100 G DE PROTEÍNA.....	8
TABLA 2: COMPOSICIÓN DE AMINOÁCIDOS PARA LA HARINA, CONCENTRADO PROTEICO Y EL AISLADO PROTEICO DE CHÍCHARO.....	13
TABLA 3: COMPOSICIÓN NUTRIMENTAL DE LA AVENA.....	17
TABLA 4: VENTAJAS Y DESVENTAJAS MÁS SIGNIFICATIVAS DE LA TÉCNICA DE EXTRUSIÓN CON ALTA HUMEDAD EN LAS PROPIEDADES DE LOS ALIMENTOS.....	6
TABLA 5. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS PROTEÍNAS VEGETAL EXTRUDIDAS PARA CONSIDERARSE DENTRO DE LA NORMATIVA PARA LOS PRODUCTOS PROTEÍNICOS VEGETALES.....	18
TABLA 6: PORCENTAJE DE INGREDIENTE PARA LAS MEZCLAS DE HARINA DE AMARANTO, HARINA DE AVENA Y AISLADO PROTEICO DE CHÍCHARO.....	29
TABLA 7: PARÁMETROS DE LOS TRATAMIENTOS DE EXTRUSIÓN.....	29
TABLA 8: COMPOSICIÓN BROMATOLÓGICA DE LA MATERIA PRIMA.....	33
TABLA 9: VALOR OBTENIDOS DE LA REGRESIÓN LINEAL.....	41
TABLA 12: TEMPERATURAS DE TRANSICIÓN VITREA.....	54
TABLA 13: TABLA DE TEMPERATURAS PARA EL ANÁLISIS DSC.....	58
TABLA 14: PARÁMETROS DE COLOR.....	60
TABLA 15: COMPOSICIÓN PROXIMAL DE LA PROTEÍNA TEXTURIZADA.....	61
TABLA 16: PERFIL DE AMINOÁCIDOS DE LA PROTEÍNA VEGETAL TEXTURIZADA.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: PARTES DE UN EXTRUSOR.....	4
FIGURA 2: ACCIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE LA EXTRUSIÓN SOBRE LA DESNATURALIZACIÓN DE LAS PROTEÍNAS.....	20
FIGURA 3. ÍNDICE DE ABSORCIÓN PARA LAS MEZCLAS EXTRUDIDAS DESHIDRATADAS.....	36
FIGURA 4. ÍNDICE DE SOLUBILIDAD EN AGUA PARA LAS MEZCLAS EXTRUDIDAS DESHIDRATADAS.....	38
FIGURA 5. CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ACEITE PARA LAS MEZCLAS EXTRUDIDAS DESHIDRATADAS.....	40
FIGURA 6. ÍNDICE DE SOLUBILIDAD PARA LA MEZCLA EXTRUDIDA DESHIDRATADA.....	42
FIGURA 7. ÍNDICE DE ABSORCIÓN DE AGUA PARA LA MEZCLA EXTRUDIDA DESHIDRATADA.....	44
FIGURA 8. CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ACEITE PARA LA MEZCLA EXTRUDIDA DESHIDRATADA.....	45
FIGURA 9. POTENCIAL DE HINCHAMIENTO PARA LA MEZCLA EXTRUDIDA DESHIDRATADA.....	46
FIGURA 10. COEFICIENTE DE EXPANSIÓN PARA LA MEZCLA EXTRUDIDA DESHIDRATADA.....	48
FIGURA 11. PORCENTAJE DE PROTEÍNA EXTRAÍBLE CON TAMPÓN DE FOSFATOS PARA LA MEZCLA EXTRUDIDA DESHIDRATADA.....	49
FIGURA 12. PORCENTAJE DE PROTEÍNA EXTRAÍBLE CON TAMPÓN DE FOSFATOS PARA LA MEZCLA EXTRUDIDA DESHIDRATADA.....	50
FIGURA 13. PORCENTAJE DE PROTEÍNA EXTRAÍBLE CON TAMPÓN DE FOSFATOS PARA LA MEZCLA EXTRUDIDA DESHIDRATADA.....	51
FIGURA 14. ELECTROFORESIS EN GELES DE POLIACRILAMIDA DE 4 A 15%.....	53
FIGURA 15. CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO.....	55
FIGURA 16. CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO.....	58
FIGURA 17. IMAGEN SEM.....	57

III. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los análogos de carne se remonta al siglo XIX, sin embargo, el creciente aumentó hasta principios del siglo XXI, así como impulsado por la demanda de opciones y/o alternativas que pudieran ofertar el mismo beneficio, textura y propiedades de la carne (Bhat *et al.*, 2015). Estas opciones se han buscado a través de los productos de origen vegetal, derivado de la preocupación por el impacto ambiental, el bienestar animal, las tendencias veganas - vegetarianas, y los problemas de salud que el elevado consumo de carne puede generar (Anderson, 2020).

Para que la proteína vegetal presente propiedades funcionales similares a la proteína de origen animal, ésta es sometida generalmente a un proceso de extrusión en ausencia o presencia de algunos hidrocoloides como la carragenina o la metilcelulosa, producto conocido como proteína vegetal texturizada (PVT) (PVT) (Wi *et al.* 2020).

Durante la extrusión, la mezcla es moldeada controlando temperatura, presión y fuerza mecánica, para obtener un producto final o un intermedio modificado (Akharume *et al.*, 2021). En la extrusión por alta humedad, la aplicación de calor y presión a una mezcla de ingredientes promueve la desnaturalización de las proteínas, la gelatinización de los almidones, y la emulsificación de los lípidos (Huerta-García *et al.* 2018).

La proteína de soya es la más estudiada y utilizada en el desarrollo de análogos de carne y se comercializa la proteína texturizada de soya para la producción de hamburguesa, salchichas y otros productos procesados. Sin embargo, actualmente un sector de la población rechaza los productos derivados de soya debido a que aproximadamente el 90% de la soya es transgénica, por lo que la falta de información y percepciones promueven en la población el rechazo de productos derivados de cultivos transgénicos. Adicionalmente, la soya tiene componentes alérgenos (Zhang *et al.*, 2019).

Por lo que se han buscado nuevas alternativas. La proteína de chícharo en adición con alguna mezcla de cereales o pseudocereales, para cumplir con los requerimientos

nutricionales del consumidor, se ha ubicado como su potencial sustituto para el desarrollo de análogos de carne (Ramírez *et al.*, 2017).

El amaranto es un pseudocereal que ha ganado popularidad en años recientes como sustituto de la harina de trigo, debido a su elevado contenido en proteínas, fibras y minerales (Gribble & Kramer 2019). La harina de amaranto se ha propuesto para ser utilizada en los análogos de carne, ya que su elevado contenido en proteínas puede ayudar a brindar una textura similar las fibras cárnicas, brindando al producto masticabilidad y firmeza similar a la de la carne (Wang *et al.*, 2019). La extrusión por alta humedad afecta los componentes del amaranto, incluyendo su contenido de almidón, proteínas y lípidos.

La harina de avena ha sido uno de los alimentos más utilizados en la alimentación humana. Se ha propuesto como un ingrediente importante para la formación de los análogos cárnicos debido a que ayuda a proporcionar textura y sensación deseada en boca, presenta un alto valor nutritivo debido a que es una buena fuente de fibra, proteínas y omega 3 y 6. La harina de avena no presenta gluten por lo que se considera buena opción para las personas celiacas o con intolerancia al gluten, además no presenta alergenicos (Liu *et al.*, 2017).

Por lo anterior, el propósito de esta investigación es el estudio de los cambios estructurales y funcionales de las proteínas de chícharo (*Pisum sativum*) avena (*Avena sativa*) y amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) de una mezcla texturizada por extrusión con alta humedad, como estrategia para el desarrollo de nuevos productos texturizados con aplicación en el área de análogos de carne.

IV. ANTECEDENTES

1. Técnica de extrusión.

En años recientes, la alimentación del ser humano ha sufrido un cambio drástico en la dieta, se recomienda una ingesta de las proteínas necesarias de un 15% a un 25% de origen animal, provocando así un interés por el desarrollo de alimentos que proporcionan el 10% restante por parte de los productos de origen vegetal, emulando las cualidades de la proteína vegetal para alimentar a la población. Adicionalmente existe sobrepoblación mundial. De acuerdo con Afshin *et al.* (2019), el consumo de proteína de origen animal se elevó en un 90% y el consumo de carnes rojas en un 18% más de lo recomendado para la dieta promedio. Esto repercute en la industria alimentaria con una demanda excesiva de proteínas de origen animal, elevando las producciones a niveles donde el abasto de materia prima no es suficiente. Una de las alternativas para incrementar la ingesta de proteínas es aprovechar otras fuentes como vegetales y hongos. Para poder ofrecer al consumidor productos con texturas similares a la carne, análogos de carne, la extrusión ha permitido el desarrollo de una variedad de productos texturizados (Ye *et al.*, 2019).

Esta tecnología debutó en la industria de los alimentos a mediados del siglo XIX, al intentar embutir carne en tripa para genera salchichas utilizando un extrusor de pistón, esto permitió observar los procesos de expansión y modificación de las proteínas al someterlas a presiones y temperaturas elevadas por un corto periodo de tiempo. Posteriormente, la extrusión se comienza a utilizar en mezclas de cereales para transformar una amplia gama de productos mejorados primarios, listos para su consumo (Egal & Oldewage-Theron, 2020).

Esta técnica permite el formado y moldeado de un sinfín de productos por el paso forzado de materiales plastificable o gelificables a través de moldes a la salida del extrusor con el fin de conseguir una estructura diferente y modificada respecto a sus características iniciales previas al proceso. Estas características y formas dependen del

molde que se tenga en uso; ruedas, letras, cuadrados, hilos, etc. El extrusor facilita el moldeado y reestructurado de los alimentos (Medina, 2021).

El extrusor se encuentra conformado por un acondicionador, una tolva de alimentación, un tornillo sin fin cilindrado y un pico de salida donde se descargará el producto final. El acondicionador realiza la función de mezclar la materia prima, añadiendo agua para su procesamiento, esta fuerza mecánica adicionada con agua propicia la humidificación de las partículas, la cual debe ser uniforme para así dar inicio al proceso. El tornillo del extrusor posee tres secciones: la alimentación, la transición y la salida donde la presión aumentará (Choton *et al.*, 2020). En la Figura 1 se muestran los componentes principales de un extrusor.

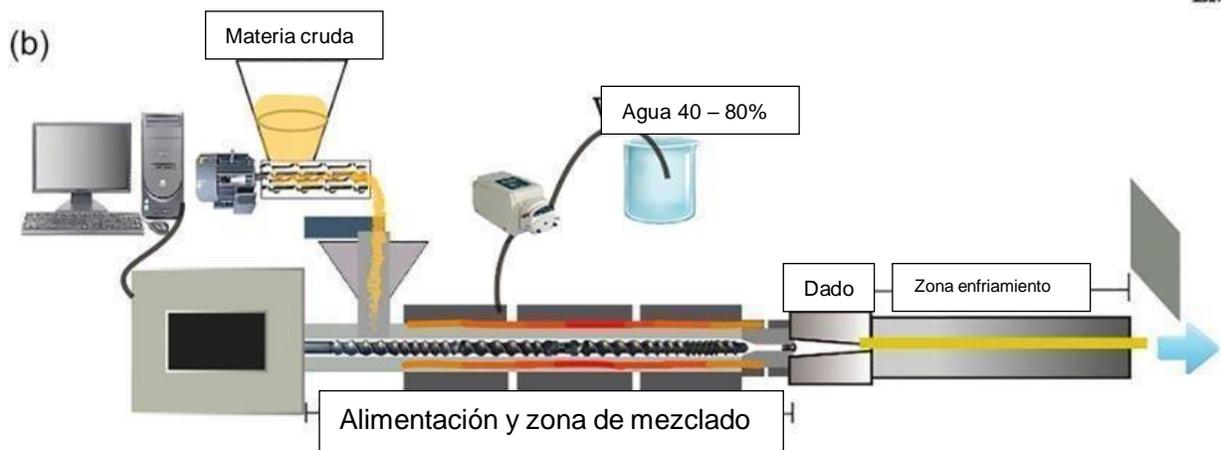


Figura 1: Partes de un extrusor.

(Modificado de Zhang *et al.*, 2018).

La sección de alimentación cuenta con un tornillo el cual posee alas altas que garantizarán el transporte de la materia prima a la boquilla. Posteriormente, en la sección de tránsito, el tornillo aumenta su diámetro gradualmente a lo largo de este, requiriendo menos altura, esto resulta en la disminución de volumen dentro del cilindro sometiendo el producto a altas presiones y facilita así la transferencia de calor y unahomogeneización completa de la materia extruida (Zhang *et al.*, 2018). Finalmente, la presión de salida aumenta.

Durante este proceso, el material introducido es sometido a una velocidad máxima sobre la superficie del tornillo y a una velocidad baja en la superficie del barril, esto genera fricción en las capas del material, este efecto es conocido como corte o cizalla, siendo el responsable de la modificación estructural de las proteínas (Mosibo *et al.*, 2022). La boquilla de salida permite el moldeado del producto, ya que el tipo de molde de salida, es el que determinará la estructura final que obtendrá el producto (Choton *et al.*, 2020).

La extrusión con alta humedad implica un proceso donde las mezclas de harinas vegetales son sometidas a altas presiones y temperaturas elevadas, dónde los componentes primarios (proteína, carbohidratos, lípidos) sufrirán cambios que ayudarán a brindar al producto final una serie de beneficios para el consumidor, entre ellos se encuentran:

1. Mayor funcionalidad de las proteínas: se ha demostrado que los aislados proteicos en mezcla con harinas de cereales, cuando son sometidos a la extrusión con alta humedad, pueden mejorar la funcionalidad de la proteína brindando propiedades funcionales mejoradas como una alta capacidad de retención de agua y una mejora en la textura (Santos *et al.*, 2019).
2. Cambios en la estructura del almidón: La extrusión con alta humedad puede causar daños en la estructura del almidón, como lo es la gelatinización y retrogradación del almidón. Estos cambios pueden afectar a la textura y digestibilidad del producto final.
3. Mayor digestibilidad: los alimentos producidos por extrusión con alta humedad tienen una mayor digestibilidad que los alimentos producidos con extrusión por baja humedad.
4. Mayor retención de nutrientes: la extrusión con alta humedad permite una mejor retención en los nutrientes de los alimentos procesados, lo cual mejor su valor nutricional.

La extrusión posee ventajas sobre otras tecnologías, las cuales generaron en la industria una tendencia para la elaboración de alimentos extruidos (Egal & Oldewage-Theron, 2020).

- Bajo costo: El espacio de trabajo requerido y el procesamiento por unidad es menor al de sistemas similares de cocinado y formado.
- Características de los productos: Los alimentos producidos por esta tecnología tienen una amplia gama de texturas, sabores, formas, colores, entre otras características físicas.
- Eficiencia energética: El cocimiento de los alimentos por extrusión de baja humedad requiere un menor tiempo de secado, por el contrario, al ser extruidos con alta humedad, no se requiere de un tiempo de secado.
- Desarrollo de nuevos productos: La mayoría de los ingredientes utilizados incluyen algunas proteínas, carbohidratos y almidón que al procesarse aumentan la diversidad de productos.
- Alimentos sin efluentes: Existe una baja o nula pérdida de sólidos, reduciendo la emisión de efluentes por parte de la planta procesadora.
- Automatización: Se puede generar una elevada capacidad de producción ya que el proceso es mayoritariamente automatizado.

La Tabla 1 presenta un resumen de las ventajas y desventajas de la extrusión con alta humedad (Choton *et al.*, 2020).

Tabla 1: Ventajas y desventajas más significativas de la técnica de extrusión con alta humedad en las propiedades de los alimentos.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
1. Mejora el acceso a los nutrientes gracias a la ruptura de la pared celular del vegetal.	1. Aglutinamiento en la salida de la tolva por una mala selección del vegetal a extrudir.
2. Elimina factores naturales que dificultan el rendimiento animal.	2. Mala selección en la temperatura genera que la proteína no forme aglutinamientos y por lo tanto se genere una textura frágil o amorfa.
3. Mejora la digestibilidad de los nutrientes además de la proteína.	

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none">4. Mayor conservación de las proteínas al tratarse de un proceso de alta temperatura y corto lapso.5. Deshidratación parcial que reduce la humedad y concentra los nutrientes.6. Obtención de un ingrediente que aporta aminoácidos digeribles como un elevado contenido de energía.7. Puede agregarse como un ingrediente adicional o principal en el ramo de alimentos funcionales para productos de alto contenido nutricional.8. Mayor aprovechamiento del recurso (mayor rendimiento de alimento).9. Disminución de la carga microbiana por el proceso de altas temperaturas durante el extruido.10. Control de temperatura durante el proceso para manipular ingredientes termo sensibles.11. Se puede incorporar con ingredientes húmedos, permitiendo la utilización de ingredientes más fresco en el desarrollo de nuevos productos. | <ol style="list-style-type: none">3. Control detallado de la humedad de la mezcla de harinas para evitar pérdida en la estabilidad.4. Control de la reducción oxidativa post-extrusión en caso de necesitar una cocción final. |
|--|---|

2. Amaranto, chícharo y avena.

2.1. Amaranto durante el proceso de extrusión.

2.1.1. Origen.

El aprovechamiento y cultivo del amaranto data de hace 5,000 años, siendo la civilización Maya la primera civilización en aprovecharlo y posteriormente los Aztecas e Incas (Basilio-Atencio, *et al.*, 2020). Con la llegada de los españoles a las costas de México y tras su invasión y conquista, la práctica “pagana” utilizando este ingrediente fue prohibida, tomando importancia en las dietas y alimentación de los conquistadores por sus grandes cualidades nutraceuticas y organolépticas (Basilio-Atencio *et al.*, 2020).

Actualmente, el amaranto es considerado uno de los pseudocereales con mayor contenido de almidón y materia harinosa, asemejándose al de las semillas de los cereales. Estas especies dicotiledóneas no son generadoras de gluten, las proteínas son de fácil digestión, gracias a estas cualidades su consumo en países europeos donde es parte natural de la dieta se ha elevado debido al desarrollo e incidencia de personas celiacas. Otra ventaja de este pseudocereal es la facilidad de cultivo y crecimiento de forma rústica que le permite adaptarse a diversos ambientes, resistiendo a temporada donde otros cereales no sobrevivirían; sequias, elevadas temperaturas y salinidad en el suelo (Lozoya, 2004).

2.1.2. Proteínas.

Se ha reportado el contenido de aminoácidos de 4 variedades de amaranto, *A. cruentus*, *A. hypochondriacus*, *A. hybridus* y *A. caudatus* (Pisarikova *et al.*, 2005). En la Tabla 2 se presenta el contenido de aminoácidos de la especie objeto de estudio en este trabajo.

Tabla 2: Contenido de aminoácidos en harinas de *A. hypochondriacus* crudo en g/100 g de proteína.

Aminoácido	Crudo	“Popping”
------------	-------	-----------

Cisteína	2.9	3.4
Aspartato	10.7	10.2
Metionina	2.3	2.1
Treonina	4.5	4.9
Serina	9.3	8.5
Glutamato	17.7	16.3
Prolina	3.7	3.2
Glicina	15.2	14.4
Alanina	6.2	4.8
Valina	5.3	3.7
Isoleucina	3.8	5.8
Leucina	6.9	0.5
Histidina	1.7	1.6
Lisina	8	7.4
Arginina	14.5	13.2

(Modificado de Pisarikova *et al.*, 2005)

Las proteínas de almacenamiento del amaranto se han clasificado utilizando el criterio de Osborne (Osborne, 1924), este se basa en la extracción de pequeñas fracciones de las proteínas contenidas en la harina que se obtiene a partir de las semillas, según la solubilidad diferencial que presentan ante diferentes medios. La fracción proteica que es extraída por medio de solubilización en agua destilada es conocida como albúmina. Sobre el residuo de esta extracción se utiliza una solución salina, que extraerá las proteínas que corresponden a las globulinas. Una vez separadas estas dos fracciones, se utiliza una solución hidroalcohólica que separará a la fracción conocida como glutelinas. Estas fracciones corresponden a las proteínas de reserva del amaranto

para la fijación de nitrógeno de la semilla y son utilizadas como fuente de energía para la germinación (Wu *et al.*, 2018).

Las globulinas del amaranto son extraídas del residuo que resulta de la extracción de las albúminas. Para lograr su extracción se utilizan soluciones salinas con un pH cercano a la neutralidad, obteniendo tres tipos mayoritariamente: 7S, 11S y globulina-P. De estas tres globulinas presentes en el amaranto, la que ayudará al proceso de extrusión con alta humedad a dar una consistencia que beneficia al producto extruido final en cuanto a su estabilización, es la globulina-P (Wu *et al.*, 2018).

La globulina-P pertenece a la familia de las 11S. Esta fracción presenta solubilidad en agua y soluciones salinas de fuerza iónica relativamente baja, por el contrario, es insoluble en concentraciones de NaCl mayores a 0.1 M (Plattner, 2020). Para lograr una extracción adecuada, es necesario utilizar agua destilada una vez que se han extraído las fracciones de 7S y 11S. El punto isoeléctrico (pI) que presenta se encuentra entre 5 y 6, es de mayor composición aminoacídica en comparación con las otras globulinas, contiene en mayor proporción la prolina, serina, arginina, histidina y fenilalanina. Es rica en polipéptidos de masas moleculares 56, 36, 31, 26 y 22 kDa (Konishi, 2018). Los polipéptidos de 56 kDa son los precursores de polipéptidos A y B, que como en la mayoría de las proteínas 11S son sintetizadas a una cadena única de polipéptidos (Atukuri, B. Odong, & H. Muyonga, 2019). La globulina-P posee la característica de modificarse postraduccionalmente, divide la cadena para la producción de polipéptidos ácidos y básicos, lo cual no es producido en todas las moléculas (Quiroga, 2018). Una de las características más importantes y particular de la globulina-P es su elevado grado de polimerización por lo que su nombre hace alusión a proteína polimerizada. Las GP presentan una elevada estabilidad ante las altas temperaturas, demostrando una desnaturalización determinada por calorimetría diferencial de barrido cercana a los 100°C (Ventureira, Martínez, & Aión, 2012).

2.1.3. Los lípidos.

Durante la extrusión, la elevada temperatura del extrusor aunado a la presión, logra una fundición de la grasa, distribuyéndola así en toda la matriz del producto. Esto puede

ayudar a mejorar la textura y la sensación en boca del producto final, ya que la grasa fundida que migró por todo el alimento creará una capa de lubricante dentro del túnel del extrusor, brindando una textura más suave y uniforme (Chen *et al.*, 2016).

Varios estudios han demostrado que el proceso de extrusión afecta la composición de los lípidos en el amaranto (Ye *et al.*, 2019). Estudios como el de Chen *et al.*, 2016 han demostrado una disminución en el contenido de lípidos totales, así como cambios en la proporción de ácidos grasos. La temperatura y el tiempo de extrusión son factores críticos que influyen en la magnitud de estos cambios (Liu *et al.*, 2017). La exposición a altas temperaturas y la aplicación de fuerzas de cizallamiento durante la extrusión pueden provocar la degradación de lípidos, la formación de compuestos volátiles y la oxidación de ácidos grasos insaturados. Estos cambios pueden resultar en la formación de sustancias no deseadas que afectan la calidad nutricional y sensorial del producto final (Zhang *et al.*, 2018).

La interacción de los lípidos del amaranto con otros componentes presentes en la harina también juega un papel importante durante el proceso de extrusión (Zhang *et al.*, 2018). Chen *et al.*, 2016 encontraron que la presencia de fibra puede afectar la absorción de lípidos, ya que puede formar complejos con ellos, disminuyendo su biodisponibilidad. Además, la interacción entre lípidos y proteínas puede afectar la formación de estructuras micelares y emulsiones, lo que a su vez influye en la textura y estabilidad del producto extruido. Los carbohidratos presentes en la harina de amaranto pueden participar en reacciones de Maillard durante la extrusión, generando compuestos con propiedades antioxidantes y saborizantes (Liu *et al.*, 2017).

2.1.4. El almidón.

Durante la extrusión con alta humedad, las moléculas de almidón en el amaranto se gelatinizarán, un proceso en el que el almidón absorbe agua se hincha y pierde su estructura cristalina (Chen *et al.*, 2016). La gelatinización del almidón dará como resultado un aumento significativo en su solubilidad y la formación de una matriz viscosa continua. La alta temperatura y presión durante la extrusión también provocará que parte

del almidón sufra retrogradación, un proceso en el que las moléculas de almidón solubles se organizan en estructuras cristalinas insolubles (Liu *et al.*, 2017).

El grado de gelatinización y retrogradación del almidón durante la extrusión con alto contenido de humedad depende de las condiciones de procesamiento, como la temperatura, el contenido de humedad y la velocidad del tornillo (Chen *et al.*, 2016). Las temperaturas más altas y los contenidos de humedad generalmente dan como resultado una gelatinización y retrogradación más extensa del almidón, mientras que velocidades más altas del tornillo pueden limitar la retrogradación al reducir el tiempo de residencia del almidón en la extrusora (Liu *et al.*, 2017).

El almidón es uno de los componentes principales del amaranto y puede constituir hasta el 70-80% de su composición total. El amaranto se caracteriza por tener un alto contenido de almidón, que varía según la especie y la parte de la planta utilizada. Estudios como el de Bello-Pérez *et al.*(2016) han reportado que el porcentaje de almidón en el amaranto puede oscilar entre el 50% y el 80% en base seca, lo que lo convierte en una fuente importante de carbohidratos en la dieta. La composición exacta puede depender de factores como la variedad, el proceso de cultivo y las condiciones ambientales.

Además del almidón, el amaranto también contiene polisacáridos no amiláceos (NSP) como celulosa, hemicelulosa y pectina. Estos NSP son resistentes a la digestión enzimática y contribuyen al contenido de fibra dietética del amaranto. Durante la extrusión con alta humedad, los NSP también pueden sufrir modificaciones estructurales debido a la alta temperatura y presión. Por ejemplo, la celulosa se puede hidrolizar parcialmente en cadenas más cortas, mientras que la hemicelulosa y la pectina se pueden solubilizar y degradar parcialmente (Chen *et al.*, 2016).

2.2. Chícharo durante el proceso de extrusión.

2.2.1. Origen del chícharo.

El cultivo de la planta del chícharo es originario de Asia Occidental, la cual fue introducida en México durante la conquista de los españoles. Actualmente se encuentra presente en la mayor parte de la gastronomía mexicana por su sabor y valor nutrimental,

es un aportador de vitaminas A y C, minerales y fibra, así como algunos de los azúcares de mayor beneficio para el cuerpo humano (Zhang *et al.*, 2019).

2.2.2. Proteínas.

La semilla de esta leguminosa logra alcanzar un contenido de proteína de 23 a 31% siendo la mayor fracción de proteínas las globulinas. Se ha demostrado que de las proteínas de chícharo tanto las fracciones albúmina y globulina representan del 10-20% y 70-80% respectivamente (Acquah, *et al.*, 2020). Esto favorece el uso del chícharo para la generación de productos texturizados, gracias a que al ser la mayor fracción de proteínas globulinas, posee una alta estabilización cuando es tratado a altas temperaturas (Acquah *et al.*, 2020).

La proteína de chícharo es considerada de alto valor nutricional y alta calidad debido a su perfil de aminoácidos, destacando el alto contenido de lisina. Sin embargo, está limitado en aminoácidos como la metionina y la cisteína, por ello se recomienda que la utilización de esta leguminosa sea formulada en combinación con algún cereal que pudiera aportar y complementar la deficiencia que esta presenta, como por ejemplo el amaranto que es rico en metionina y cisteína (Corgneau *et al.*, 2019). La Tabla 3 resume el contenido de aminoácidos reportado para harina, concentrado y aislado proteico de chícharo.

Tabla 3: Composición de aminoácidos para la harina, concentrado proteico y el aislado proteico de chícharo.

Aminoácido	Harina (mg/100g)	Concentrado proteico (mg/100g)	Aislado proteico (mg/100g)
Aspartato	10.46	11.58	11.52
Treonina	3.66	3.12	3.69
Serina	4.37	4.96	6.09
Glutamato	16.60	16.39	17.03
Prolina	5.56	4.30	5.01
Glicina	4.43	4.50	4.68
Alanina	4.53	4.13	4.41
Cisteína	0.34	0.35	0.73

Valina	5.20	5.13	4.81
Metionina	0.86	0.85	0.78
Isoleucina	3.80	3.48	3.68
Leucina	6.36	6.94	8.16
Tirosina	3.05	3.35	3.79
Fenilalanina	4.54	4.67	5.18
Lisina	8.58	8.12	8.96
Histidina	3.40	3.39	3.81
Triptófano	0.50	0.51	0.51
Arginina	13.76	14.22	7.15

(Modificado de: Tömösközi *et al.*, 2001)

La albúmina de chícharo es una proteína soluble en agua que se encuentra en grandes cantidades en los granos de chícharo. Esta proteína tiene una estructura globular compacta y una carga neta positiva, lo que la hace altamente hidrófila y capaz de formar complejos con otros componentes alimentarios, como los carbohidratos y las grasas. Durante la extrusión con alta humedad, la albúmina de chícharo puede interactuar con otros componentes alimentarios para formar una matriz proteica que afecta la textura y la firmeza del producto final.

La capacidad de la albúmina de chícharo para formar una matriz proteica durante la extrusión con alta humedad ha sido ampliamente estudiada. Por ejemplo, en un estudio realizado por Wang *et al.* (2018), se encontró que la adición de albúmina de chícharo a una mezcla de harina de trigo y agua mejoró la capacidad de retención de agua del producto final, así como su firmeza y textura. Otro estudio realizado por Das *et al.* (2018) encontró que la albúmina de chícharo puede formar complejos con los carbohidratos durante la extrusión con alta humedad, lo que resulta en una matriz proteica más densa y una textura más firme del producto final.

Además de sus interacciones con otros componentes alimentarios durante la extrusión con alta humedad, la albúmina de chícharo también ha demostrado tener propiedades funcionales únicas. Por ejemplo, en un estudio realizado por Singh *et al.* (2018), se

encontró que la albúmina de chícharo tiene una capacidad de emulsificación significativa, lo que la hace útil en la producción de alimentos emulsionados como mayonesa y aderezos.

La globulina de chícharo es una de las proteínas más importantes presentes en los granos de chícharo (*Pisum sativum*). Se encuentra en grandes cantidades en la semilla y su estructura es compleja, formada por varias subunidades, incluyendo la legumina y la vicilina (García-Tejeda *et al.*, 2011). En los últimos años, ha habido un creciente interés en el uso de la globulina de chícharo como ingrediente funcional en alimentos procesados, como los productos extruidos.

Durante la extrusión con alta humedad, la globulina de chícharo tiene una serie de interacciones con otros componentes alimentarios que afectan tanto la calidad del producto final como las propiedades nutricionales de la proteína en sí (Hanet *al.*, 2019). Por ejemplo, se ha demostrado que la presencia de lípidos en la mezcla de extrusión tiene un impacto significativo en la estructura y estabilidad de la globulina de chícharo, lo que puede afectar la calidad del producto final (Ktenioudaki *et al.*, 2019). La presencia de lípidos también puede reducir la digestibilidad de la proteína, lo que puede tener implicaciones importantes para la biodisponibilidad de los nutrientes.

Además, la globulina de chícharo también interactúa con otros ingredientes comúnmente utilizados en la extrusión, como los carbohidratos (Liet *al.*, 2021). Se ha demostrado que la presencia de almidón en la mezcla de extrusión puede mejorar la estabilidad de la globulina de chícharo y reducir la formación de agregados proteicos no deseados. Por otro lado, la globulina de chícharo es conocida por su alto contenido de aminoácidos esenciales y su capacidad para formar geles y espumas, lo que la hace un ingrediente muy versátil en la industria alimentaria. En particular, su capacidad para formar geles se ha utilizado para mejorar la textura y la estabilidad de los productos extruidos, y para crear productos cárnicos veganos y vegetarianos.

2.3. Avena durante el proceso de extrusión.

2.3.1. Origen de la avena.

La avena es proveniente de Asia central, era considerada como una hierba mala ya que solía aparecer en los cultivos de trigo o cebada. Fue encontrada en los registros por primera vez en Egipto, descrita como hierba mala que afectaba a los cultivos de trigo o cebada quitando los nutrientes a estas plantas y evitando su desarrollo total. Posteriormente se encontraron registros de su aprovechamiento en Europa central y datan de la época de bronce (FENALCE, 2009).

2.3.2. Valor nutritivo.

Las proteínas en la avena son abundantes; de hasta un 16.9% y presentan una alta biodisponibilidad. Contiene todo el perfil completo de aminoácidos esenciales, aunque no en cantidades óptimas para cumplir los requerimientos del ser humano (Oliva & Adalberto, 2016). La avena presenta niveles bajos de lisina y treonina, pero excesos de metionina. Por el contrario, las leguminosas presentan altos contenidos de lisina y treonina, pero bajos niveles de metionina, por ello, la combinación de cereales como la avena y leguminosas es óptima, ya que ambos alimentos se complementan para generar una proteína completa; aquella que presenta los 20 aminoácidos (Vizúete, 2015).

La avena es el cereal que más nutrientes presenta de todos, ya que contiene el doble de grasas que el trigo y una cantidad proteica más elevada. La avena es conocida por ser una fuente relativamente alta de lípidos en comparación con otros cereales. El contenido de lípidos en la avena puede variar entre el 5% y el 10% en base seca, dependiendo de factores como la variedad, las condiciones de cultivo y el procesamiento posterior. Estos lípidos están compuestos principalmente por ácidos grasos insaturados, como el ácido linoleico y el ácido oleico, que se consideran beneficiosos para la salud humana.

La avena presenta un 80% de grasas insaturadas, destacando el ácido linoleico y un 20% de grasas saturadas. Gracias a esto, tiene un efecto regulador sobre la síntesis de colesterol. Presenta hidratos de carbono de fácil asimilación y de lenta absorción, por lo que proporciona energía horas después de su consumo, destacando el almidón, la fructosa (altamente recomendada para diabéticos, al no precisar de insulina para su ingreso a la célula), y mucilagos (constituye parte de la fibra soluble, ayuda lubricando y

suavizando el interior del conducto digestivo). Presenta altas concentraciones de fósforo, hierro con un 4.27mg/100g, el cual supera a la carne (3mg/100g). La Tabla 4 resume el contenido de nutrientes de la avena.

Tabla 4: Composición nutrimental de la avena.

NUTRIENTES	Cantidad en 100g de avena
Energía (kcal)	326
Proteínas (g)	13.3
Grasas totales (g)	4.0
Carbohidratos totales (g)	72.2
Fibra cruda (g)	1.7
Cenizas (g)	1.7
Calcio (mg)	49
Fósforo (mg)	407
Zinc (mg)	3.97
Hierro (mg)	4.10
Tiamina (mg)	0.15
Riboflavina (mg)	0.09
Niacina(mg)	1.00
Vitamina C (mg)	0.00

(F.E.N., 2017.)

Adicionalmente, contiene dos de los fitoquímicos que son únicos de este cereal: las avenantramidas (AVAs) y saponinas esteroidales (Sang, 2017). Las AVAs presentan una actividad antioxidante de 10 a 30 veces por encima de la presentada por los compuestos fenólicos, además, tienen capacidades anti-inflamatorias y anti-aterogénicas. Asimismo, regulan la presión arterial al producir óxido nítrico, el cual actúa como vasodilatador (Varma, Bhankharia, & Bhatia, 2016).

2.3.3. Contenido de fibra en la avena.

Este cereal destaca especialmente por el alto contenido de fibra que presenta (Aparicio & Ortega , 2015). Incluye también polisacáridos, oligosacáridos y lignina. Gracias al comportamiento de los diversos tipos de fibra con el agua, se reconocen dos grupos: fibra soluble e insoluble. Estas fibras solubles poseen una mayor capacidad para retener el agua, lo cual origina en las soluciones una gran viscosidad y pueden ser fermentadas por la microbiota intestinal, lo cual contribuye positivamente a las bacterias del intestino. Dentro del grupo de las fibras solubles podemos destacar las pectinas, hemicelulosas, las gomas, mucílago y algunos polisacáridos procedentes de las algas. Esta capacidad gelificante de las fibras solubles es la responsable de una gran cantidad de efectos positivos, tanto de la disminución de la glucemia postprandial como de la atenuación de los niveles de colesterol en la sangre. También mejora la motilidad intestinal (Oliva & Adalberto, 2016).

La avena es un alimento que presenta un alto contenido de beta glucanos, los cuales componen parte de la fibra dietética, resisten la absorción y digestión por parte del intestino delgado, gracias a esto, disminuyen el colesterol sérico y regulan la respuesta de la glucosa sanguínea (Choton *et al.*, 2020).

3. Proteínas vegetales texturizadas (PVT).

Las proteínas vegetales texturizadas (PVT) de acuerdo con la norma para productos proteínicos vegetales (PPV., CXS 174-1989) son aquellos productos de origen vegetal que cumplen con las condiciones de composición nutrimental que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición química de las proteínas vegetal extrudidas para considerarse dentro de la normativa para los productos proteínicos vegetales.

Componente	Valor (g en base seca por cada 100g de producto)
Proteína	≥ 50

Fibra cruda	≤ 15
Cenizas	≤ 10
Humedad mezcla antes de ser sometida a la extrusión	40% - 80%

La comercialización de proteínas vegetales texturizadas inició con la soya (De Angelis *et al.*, 2020). En muchas ocasiones se utiliza la tecnología de extrusión, la cual en conjunto con algunos hidrocoloides como lo son la carragenina o la metilcelulosa produce análogos de carne (Wi *et al.*, 2020). Los productos modernos como la carne de hamburguesa o salchichas generalmente están producidas a base de proteína de chícharo. Así mismo, el incremento de gluten en la proteína extruida se refleja en la uniformidad de las cavidades de aire y la compactibilidad (Chen, 2018).

La extrusión a altas temperaturas ha demostrado una gran reducción en la disponibilidad de algunos aminoácidos y un decremento en la digestibilidad de algunas proteínas (Zhang *et al.*, 2019). Palanisamy *et al.* (2019) demostraron que las proteínas extruidas con alto contenido de humedad de 40% al 75%, tienen una digestibilidad más elevada, en un 3 a 6% comparado con la misma proteína en crudo.

3.1. Efecto de la extrusión sobre proteínas vegetales.

Durante la extrusión con alta humedad, la materia prima es sometida a presiones altas, así una vez que el producto llega a la salida del extrusor, las proteínas vegetales son modificadas por presión, temperatura y fuerzas mecánicas. Este proceso se denota en una desnaturalización de la proteína, así como en cambios en la estructura molecular de las mismas, facilitando la formación de agregados. Dentro de este proceso las proteínas forman complejos proteína – proteína y proteína – polisacáridos de alto peso molecular (Wu *et al.*, 2018). Para conseguir una estructura fibrosa es necesario una disminución de temperatura en la salida de la extrusión, para así promover una reorientación de las proteínas y lograr formar una red anisotrópica proteica (Lui & Hsieh, 2018).

Estos cambios suceden en mayor magnitud dentro del cilindro del extrusor, sometiendo a la materia prima a presiones y temperaturas elevadas, que cambiarán las propiedades de la materia prima a un producto con una viscosidad más elevada, plastificable o expansible por una re-organización de los biopolímeros, desnaturalización de proteínas, así como la gelificación del almidón (Lui & Hsieh, 2018).

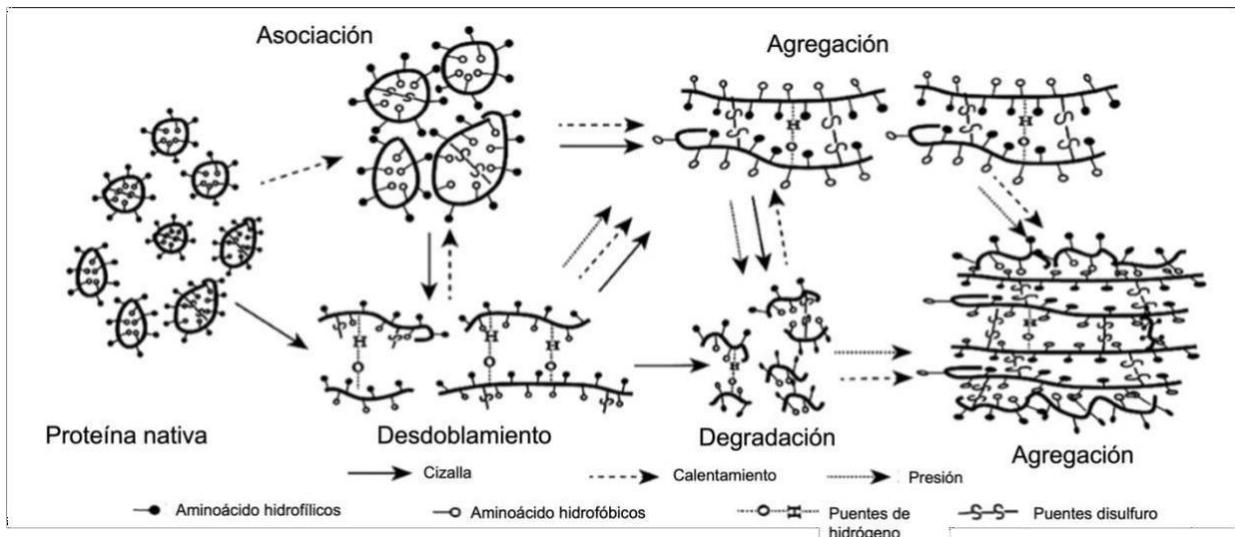


Figura 2: Acción de la temperatura durante la extrusión sobre la desnaturalización de las proteínas.

(Modificado de Zhang et al, 2018).

La acción de la temperatura durante la extrusión sobre la desnaturalización de las proteínas es presentada en la Figura 2. Las proteínas son compuestos conformados por cadenas de aminoácidos organizados en estructura: primaria, secundaria, terciaria y cuaternaria (Akharume *et al.*, 2021). Durante la extrusión, la temperatura genera un efecto de desnaturalización en la proteína, es decir que la estructura terciaria o la forma en la que se ha enrollado se extenderá (Akharume *et al.*, 2021). La extrusión genera un estiramiento en la cadena de aminoácidos, lo cual convierte a la proteína en un polímero más susceptible a reacciones enzimáticas en el sistema digestivo del cuerpo humano generando así, un producto de fácil asimilación (Bhise *et al.*, 2015).

3.2. Efecto de la extrusión sobre las grasas.

Durante el proceso de extrusión, las pequeñas gotas de aceite presentes en la materia vegetal se someten a presiones elevadas donde son recubiertas por los almidones y proteínas. Estas gotas de aceite son más susceptibles a la acción de los ácidos gástricos digestivos, por ello, la energía que este compuesto entrega se vuelve mayor para el ser humano (Ramírez *et al.*, 2017).

Actualmente se busca el desarrollo de una mezcla de ingredientes vegetales que aporte una gran cantidad de proteínas y que no contenga un alérgeno como la soya. Así mismo, esta mezcla vegetal debería emular el sistema anisotrópico que presenta la proteína animal. El gluten de trigo es uno de los ingredientes más populares dentro de las PVT ya que posee una característica única de formar estructuras anisotrópicas similares a las de la carne; sin embargo, no es apto para la población celiaca (Asgar, 2019).

Una de las alternativas a estas mezclas que hoy en día se están desarrollando tiene como base la harina de chícharo, algún aislado proteico y mezclado con cereales para un alto contenido de fibra. La proteína de chícharo funge como el ingrediente principal por su alto contenido de proteína vicilina; la cual es un grupo de proteínas de reserva de las leguminosas, esta es similar a los aminoácidos esenciales (AAE) de la β -conglucina que aporta la soya (Asgar, 2019).

3.3. Efecto de la extrusión sobre el almidón.

El almidón se encuentra conformado por amilosa y amilopectina, polisacáridos formados por moléculas de glucosa y amilosa, en forma lineal para el caso de la amilosa y ramificada para la amilopectina (Ye *et al.*, 2019). Al aumentar la temperatura, estas moléculas se fragmentan y se convierten en moléculas solubles; proceso conocido como dextrinización (Immonen *et al.*, 2021).

La gelatinización del almidón durante la extrusión con alta humedad permite que el almidón adquiera una textura gelatinosa y mejore su capacidad de retención de agua. La gelatinización del almidón es un proceso fundamental durante la extrusión con alta humedad. Durante este proceso, el almidón experimenta cambios estructurales debido

a la aplicación de calor y humedad. La gelatinización implica la ruptura de las estructuras cristalinas del almidón y la absorción de agua en las cadenas de amilosa y amilopectina. Según Srichuwong et al. (2009), la gelatinización se inicia cuando la temperatura alcanza el punto de gelatinización específico del almidón, que varía según el tipo de almidón. Durante la gelatinización, las moléculas de almidón se hinchan, se vuelven amorfas y pierden su estructura cristalina. Este proceso permite que el almidón retenga más agua y adquiera una textura suave y gelatinosa.

Sin embargo, la retrogradación posterior puede afectar negativamente la textura y la calidad del producto final. La formación de estructuras gelificadas en el almidón es crucial para la obtención de productos extruidos con características deseables en términos de textura, estabilidad y funcionalidad. La retrogradación del almidón es un fenómeno que ocurre después de la gelatinización durante la extrusión por alta humedad. La retrogradación implica la reorganización de las cadenas de amilosa y amilopectina, y la formación de estructuras cristalinas en el almidón gelificado. Según Bhattacharya y Hanna (1985), la retrogradación se ve influenciada por factores como la temperatura de enfriamiento y el tiempo de almacenamiento. Durante la retrogradación, las moléculas de almidón gelificadas se realinean y forman estructuras cristalinas, lo que puede dar lugar a la pérdida de la textura gelatinizada y a la aparición de una textura más firme. Este proceso puede afectar negativamente la calidad y la textura del producto final, especialmente si se produce una retrogradación excesiva.

Durante la extrusión con alta humedad, se produce la formación de estructuras gelificadas en el almidón. La interacción entre las cadenas de amilosa y amilopectina se intensifica debido a la alta temperatura, presión y humedad presentes durante el proceso. Esta interacción conduce a la formación de redes tridimensionales que retienen agua y confieren una textura y consistencia deseables al producto extruido. Según Abdel-Aal et al., (2013), la formación de estructuras gelificadas en el almidón puede mejorar la estabilidad del gel, la capacidad de retención de agua y la resistencia a la desintegración. Estas estructuras también pueden contribuir a las propiedades viscoelásticas del producto extruido y a su capacidad de soportar manipulación y procesamiento adicionales.

V. JUSTIFICACIÓN

La soya texturizada es un ingrediente común en la industria alimentaria debido a su versatilidad, bajo costo y alto contenido de proteínas. Sin embargo, en los últimos años ha habido un aumento en la demanda de alternativas a la soya debido a preocupaciones ambientales, de salud y éticas.

Una posible alternativa a la soya texturizada son los productos a base de amaranto, avena y chícharo texturizados. Estos ingredientes tienen varias ventajas sobre la soya texturizada, incluyendo su alta calidad nutricional, su perfil de aminoácidos y su bajo contenido de alérgenos. El amaranto es una fuente de proteína completa que contiene los aminoácidos esenciales que nuestro cuerpo necesita. Es rico en fibra y minerales como el hierro, el calcio y el magnesio. La avena también es una buena fuente de proteína y fibra, y contiene betaglucanos que ayudan a reducir el colesterol y mejorar la salud cardiovascular. El chícharo es rico en proteínas y contiene aminoácidos como la lisina, que a menudo se encuentran en cantidades limitadas en otros granos.

Además de su perfil nutricional, los productos a base de amaranto, avena y chícharo texturizados pueden ser más sostenibles que la soya debido a su menor impacto ambiental y su cultivo localizado. También tienen un menor riesgo de contaminación con pesticidas y herbicidas, que a menudo son utilizados en la producción de soya.

La aplicación de la extrusión dentro de la industria alimentaria genera una amplia gama de productos, ya que se puede emplear para la generación de diferentes texturas, tamaños, formas, etc. El uso de la extrusión mantiene y mejora las propiedades funcionales de las proteínas y polisacáridos..

Considerando el aumento de la población que busca una alternativa a los productos cárnicos, así como el rechazo a los productos análogos de carne que actualmente se ofertan en el mercado, se ha propuesto aplicar la técnica de extrusión con alta humedad para la generación de un producto análogo a la carne usando harinas de amaranto y avena y aislado proteico de chícharo.

VI. HIPÓTESIS

La extrusión de una mezcla de harina de amaranto (45%) y avena (15 %) y aislado proteico de chícharo (40 %), con humedad de 50-70 %, con un giro de tornillo de 35 rpm y temperatura de primera zona de 90 °C y con temperaturas de segunda zona entre 120-140 °C modificará las propiedades funcionales de las proteínas generando un producto texturizado con matriz fibrosa y una alta absorción de agua.

VII. OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar los cambios estructurales y funcionales de las proteínas de una mezcla de aislado proteico de chícharo, harina de avena y amaranto texturizada mediante extrusión con alta humedad.

Objetivos específicos

1. Caracterizar químicamente la harina de amaranto, harina de avena y el aislado proteico de chícharo.
2. Determinar las condiciones experimentales de extrusión con alta humedad para texturizar la mezcla de harina de amaranto y avena adicionado con aislado proteico de chícharo.
3. Evaluar las propiedades fisicoquímicas y funcionales de la proteína vegetal texturizada obtenida por extrusión.

VIII. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Materia prima.

- Se obtuvieron los granos de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) sin reventar, cultivado por productores del Estado de Morelos, oriundos de la reserva de la biósfera de Tehuacán-Cuicatlán. Los granos se molieron en un molino Pulvex 200 y tamizaron con una malla #40 para homogeneizar el tamaño de partícula.
- El aislado proteico de chícharo se obtuvo mediante el proveedor MakyMat a un porcentaje de 85% de proteína y se tamizó con una malla del #100.
- La harina de avena se obtuvo de la marca RedHot Mill's en hojuelas deshidratadas sin gluten, se molió mediante un molino Pulvex 200 mediante una criba del #8 y posteriormente fue tamizado con una malla del #40.

Para el cumplimiento del objetivo 1 se realizaron los siguientes experimentos:

1.1. Caracterización química de las materias primas.

a) La cantidad de proteína se determinó por triplicado mediante el método de Kjeldahl (AOAC, 2013). Se pesó 1 g de muestra sobre papel libre de nitrógeno a peso constante. Posteriormente se colocó la muestra en un matraz Kjeldahl y se adicionaron 5 g de mezcla catalizadora y 10 mL de H₂SO₄ concentrado. Se llevó el matraz a un digestor Buchi (SpeedDigester K-425) a 500 °C y una vez completada la oxidación de la muestra (presentó coloración verde) se enfrió el matraz, y se agregaron 100 mL de agua destilada. Posteriormente se agregaron lentamente 10 mL de NaOH al 32%, inmediatamente la mezcla se conectó a un sistema de destilación Buchi Kjeldahl (K-365 Kjel), a la salida se colocaron 60 mL de ácido bórico al 4% adicionado con mezcla de indicadores rojo de metilo y verde de bromocresol. Se recolectó la solución destilada. Finalmente se tituló con solución de HCl 0.1 N hasta observar el cambio de color de verde a violeta. El porcentaje de proteína se obtuvo mediante la ecuación 1.

$$\%P = \frac{(Ma - Mb) \times N \times 0.014 \times 6.25}{Pm} \times 100 \quad Eq. (1)$$

Donde:

%P = Porcentaje de proteína

N = Normalidad del ácido titulante

Ma = volumen en mL del ácido gastado en la titulación de la muestra

Mb = volumen en mL del ácido gastado en la titulación del blanco

Pm = Peso de la muestra en gramos

6.25 = Factor de conversión del nitrógeno a proteína

- b) El porcentaje de fibra cruda se determinó por triplicado por el método 945.38. A.O.A.C. (2005). Se pesaron 2 gramos de muestra y se agregaron 200 mL de ácido sulfúrico más 10 mL de antiespumante (silicona), se digirió la muestra en el quipo (Crude Fiber Apparatus - 09681B, Labconco) durante 30 minutos con 20 mL de hidróxido de sodio, posteriormente se calcinó el residuo a 600 °C en la mufla y se comparó el peso final de la muestra calcinada contra el peso inicial de la muestra. El % de fibra cruda se calculó mediante la ecuación (2).

$$\% Fc = \frac{Pcf - P}{Pm} \times 100 \quad Eq. (2)$$

Donde:

%Fc = Porcentaje de fibra cruda

Pcf = Peso del crisol más la muestra desecados a 105 °C

Pcc = Peso del crisol más la muestra posterior a la incineración

Pm = Peso de la muestra

- c) El porcentaje de lípidos se obtuvo mediante el método GoldFish por triplicado. Se pesó 1 g de muestra seca, se colocó dentro del tubo en el aparato de extracción GoldFish Labconco (LABCO07017). Se agregaron 35 mL de éter de petróleo (40° -

60° C) en el vaso de extracción. Se adicionó el mecanismo de enfriamiento. La mezcla se dejó en ebullición durante 6 h. Se extrajo la muestra del equipo y se colocó a 110°C por 15 minutos. Se enfrió en un desecador y se calculó el contenido de grasas (% m/m) en la muestra seca.

- d) El contenido de humedad se analizó mediante una termobalanza FLB FORELIBRA (FLB-MA-110), donde se pesó 1 g de muestra. Se dejó en la balanza durante 1 a 2 horas hasta alcanzar un peso constante. Se registró el dato obtenido. El experimento se realizó por triplicado.
- e) El porcentaje de carbohidratos se determinó por diferencia de los porcentajes los resultados anterior obtenidos (fibra, ceniza, proteína, grasa y humedad) de un total del 100%.

El pH de la mezcla de harina se obtuvo mediante el método 943.02. A.O.A.C., 2005; consistiendo en pesar 10 gramos de la mezcla de harina y añadiendo 100 mL de agua a 25°C. La suspensión se mantuvo en agitación por 30 minutos, posteriormente se dejó reposar 10 minutos, se decantó en un vaso de precipitados y se determinó el pH con un potenciómetro ThermoScientific (Orion Star A111).

La cantidad de ceniza se obtuvo siguiendo el método 920.85. A.O.A.C, (2005). Se pesaron 1.5 g de muestra homogénea en un crisol que previamente se taró, desecó y enfrió. La muestra se calcinó con una mufla Arsa (AR-340) a 550 °C durante 6 h o hasta alcanzar un peso constante. Posteriormente, la muestra se enfrió en un desecador y se pesó después de alcanzar la temperatura ambiente. El experimento se realizó por triplicado.

1.2. Electroforesis desnaturizante (SDS-PAGE).

Se obtuvieron asilados proteicos para la harina de amaranto y avena mediante la metodología de Cortez-Trejo *et al.*, 2022. Brevemente, se desgrasaron las harinas durante 24h en agitación mediante la adición de hexano en proporción 1:10, se recuperó el sólido permitiendo la evaporación del hexano al extender la muestra en una charola de aluminio dentro de la campana de extracción. Posteriormente se recupera el sólido y se agrega agua destilada en proporción 1:10 se ajusta el pH a 12 con NaOH 0.1N o HCl

0.1 N según sea necesario, posteriormente se centrifuga a 9000 g durante 20 minutos a 15 °C, se recupera el sobrenadante y a este se ajusta el pH a 4 con NaOH 0.1 N o HCl 0.1 N según sea necesario, y se centrifuga a 9000 g durante 20 minutos a 4 °C. El precipitado se recupera, posteriormente se liofiliza y guarda en ausencia de humedad hasta su uso posterior. Este procedimiento se realizó para la harina de amaranto y avena, siendo que el aislado proteico de chícharo se tenía al 85%.

La proteína total de los tres aislados proteicos fue analizada mediante electroforesis desnaturalizante en geles de poliacrilamida (BioRad). Brevemente, se tomó 300 mg de cada aislado proteico y se suspendió en 1 mL de H₂O. Las soluciones se agitaron utilizando un vortex Scientific Industries (Vortex Gene 2) durante 5 minutos. 50 µl de solución de muestra y 50 µl de buffer de carga (con y sin DTT) se colocaron en tubos Eppendorf de 2 mL, y se incubaron con agitación en un Thermomixer R (90°C, 300 rpm durante 5 minutos). Se tomó una alícuota de 15 µl de cada muestra y se colocaron en los pocillos del gel. El gel se corrió en la cámara electroforética (marca BIO RAD) a 110 volts durante 95 minutos. El análisis se realizó utilizando un foto documentador de la marca ProteinSimple y su respectivo software (Alphalmager HP 3.4.0).

Para el cumplimiento del objetivo 2 se realizaron las siguientes determinaciones:

2. Determinación de las variables de operación para la extrusión.

2.1. Acondicionamiento de materia prima.

Se preparó la mezcla presentada en la Tabla 6 y fue humedecida mediante la adición de agua destilada hasta alcanzar la humedad del 50%, 60% y 70% determinada con una termobalanza FLB FORELIBRA (FLB-MA-110). Se consideró que la mezcla tendría un porcentaje no menor al 40% de proteína y no mayor al 15% de fibra. Esta mezcla fue identificada como MA.

El extrusor utilizado en el presente proyecto cuenta con las siguientes características:

Un extrusor de un solo tornillo con dos zonas de calentamiento construido por CICATA-IPN Querétaro (México) con el número de patente (Patente MX/a/2007/016262). El

tornillo cuenta con un diámetro de 2.54 cm, una relación L/D = 19, y una hélice de 1/8 pulgadas de profundidad y un dado a la salida de 2.5 mm x 1.5 cm.

Tabla 6: Porcentaje de ingrediente para las mezclas de harina de amaranto, harina de avena y aislado proteico de chícharo.

Nombre de la mezcla	Harina de Amaranto	Aislado Proteico de Chícharo	Harina de Avena
MA	45%	40%	15%

2.2. Diseño de experimento para la extrusión.

Los parámetros para las variables de temperatura del proceso de extrusión se basaron en los determinados por Atukuri, *et al.*, (2019) y la velocidad de giro del tornillo se basó en lo fundamentado por Arias (2021). Para todos los tratamientos (Tabla 7), la temperatura de la primera zona de calentamiento del extrusor se mantuvo a 90 °C con una velocidad de giro de tornillo de 35 rpm.

Tabla 7: Parámetros de los tratamientos de extrusión

Temperatura (°C) Segunda zona	Humedad (%)
120	
130	50, 60 y 70 %
140	

Los productos extrudidos fueron evaluados mediante el coeficiente de expansión, que fue determinado por el método de Chávez-Jáuregui (2015) y la ecuación (3 y 4).

$$E = \frac{d_e}{\overline{d_b}} \quad \text{Eq. (3)}$$

Donde:

E = Coeficiente de expansión

d_e = Alto del extruido

d_b = Alto de la boquilla de salida

$$E = \frac{d_a}{d_c} \quad Eq. (4)$$

Donde:

E = Coeficiente de expansión

d_a = Ancho del extruido

d_c = Ancho de la boquilla de salida

3. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y funcionales de mezcla texturizada.

3.1. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de la mezcla texturizada.

Para algunas determinaciones se usó la mezcla extrudida seca y molida. La muestra extrudida se secó por 6 h en un deshidratador de alimentos Food Dehydrator (Econ 2500 5-try-440) a 40 °C y fue molida a mano en un mortero de cerámica, para posteriormente tamizarla a un tamaño de malla del número 60.

- a) El contenido de proteína, lípidos, ceniza, fibra total, carbohidratos, humedad y pH fueron determinados siguiendo la metodología descrita en el numeral 1.1.
- b) El análisis de aminoácidos totales fue realizado por servicios externos del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. (CIATEJ) por el método INS-SM/US-260.
- c) A partir del material extrudido se aisló la proteína y se obtuvo una electroforesis de acuerdo con la metodología ya descrita.
- d) El índice de absorción de agua e índice de solubilidad en agua se obtuvieron mediante el método descrito por Alam (2014); el cual consistió para el IAA en pesar 2.5 g de la mezcla de harinas (extrudidas y no extrudidas) en un tubo de centrifuga, al cual se le adicionó agua destilada (10 mL) a 30°C y se sometió a

agitación con vortex durante 2 minutos a pH 7. Posteriormente, los tubos fueron centrifugados a 4000 rpm durante 20 minutos, se decantó el sobrenadante en una probeta volumétrica para obtener el volumen final. Se pesó el restante en el tubo de centrífuga y se obtuvo la relación entre el peso inicial de la muestra y posterior a decantar el volumen. Para el ISA el sobrenadante se filtró con papel filtro y se dejó secar en cajas petri durante 4 horas a 90°C. Se pesó el filtrado en el papel y se obtuvo la relación entre lo retenido en el papel filtro y el tubo de centrífuga, contra el peso de la muestra inicial.

- e) El poder de hinchamiento y la capacidad de retención de aceite se midieron mediante el método descrito por Raghavendra *et al.*, (2004) y Wang *et al.*, (2016) con modificaciones. Para el poder de hinchamiento se tomaron segmentos secos de 5x5x2.5 mm del extrudido y 1 g seco de la mezcla sin extrudir, los cuales se hidrataron con 30 mL agua destilada durante 2 horas. Se dejaron en reposo a temperatura ambiente y posteriormente las muestras se pesaron. El poder de hinchamiento se calculó mediante la ecuación (4).

$$PH \left(\frac{g}{g} \right) = \frac{WA}{Wi} \quad Eq. (5)$$

Donde:

WA: peso del agua retenida

Wi: peso de la muestra

Para la determinación de la capacidad de retención de aceite, se pesó 1 g de cada muestra seca, molida y tamizada, se adicionaron 10 mL de aceite puro de soya en tubos de centrífuga. Se agitaron en vortex durante 5 minutos, después de 1 h en reposo se agitaron en vortex por 2 minutos. Inmediatamente se centrifugaron a 10,000 x g durante 40 minutos. Se decantó el sobrenadante y se dejaron invertidos los tubos durante 1 minuto para retirar la mayor cantidad de aceite en el tubo. La capacidad de absorción de aceite (CAC) se obtuvo mediante la ecuación (6).

$$CAC \left(\frac{g}{g} \right) = \frac{Wo}{Wi} \quad Eq. (6)$$

Donde:

Wo: peso del aceite retenido

Wi: peso de la muestra

- f) El análisis de perfil de textura (APT) se realizó por triplicado utilizando un texturómetro (Brookfield CT3 Ametek) mediante una sonda de 3 mm (TA44), una velocidad de 2 mm/s, una fuerza de 0.05 N y una tensión del 25% del tamaño original.
- g) El análisis de color se realizó mediante un colorímetro (Spectrophotometer CM-600d). Las muestras secas y molidas antes y después del proceso de extrusión se evaluaron por triplicado. Se usó el software Spectra Magix NX en escala L, a*,b* para posteriormente reportarse en escala RGB.
- h) El estudio de calorimetría diferencial de barrido (DSC por sus siglas en inglés) se realizó siguiendo la metodología descrita por Karlsson y Eliasson (2003) con ligeras modificaciones. Las muestras (10 mg) se secaron a 40° C durante 6 h en Food Dehydrator (Econ 2500 5-try-440) y se guardaron en un desecador marca Nalgene. El estudio se realizó en un equipo DSC (TA Q 2000, TA Instruments, New Castle, DE, USA) a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en un intervalo de temperatura de 30-200 °C. Se utilizaron crisoles de aluminio (TA Tzero Hermetic Lid T 200925).

3.2. Determinación de las interacciones intermoleculares.

Las interacciones intermoleculares se determinaron mediante la metodología propuesta por Arêas (1992) y Luis and Hseih (2008). Se tomaron muestras pre-extrusión y post-extrusión, ambas muestras fueron secadas hasta una humedad de 4%, molidas y tamizadas con malla #60. Se tomaron 100 mg de muestra y se agregaron 10 mL de solución buffer de fosfato de sodio (PB) a pH 6.9 para romper las interacciones electroestáticas. Posteriormente se tomaron 100 mg de muestra y se agregaron 10mL de PB + Urea 8 M + SDS 1.7 mM para romper los enlaces no-covalentes. Las

interacciones covalentes se redujeron utilizando 100 mg de muestra y solución PB (10 mL) adicionado con 10 mM de agente reductor ditioneitol (DTT) como agente selectivo. Posteriormente, se sometieron las muestras a agitación rotatoria 200 rpm durante 1 h. Se centrifugaron durante 50 min a 4640 g y se recuperó el sobrenadante. El sobrenadante fue corrido en un espectrofotómetro a una absorbancia de 280 nm en celdas de cuarzo. Los experimentos se realizaron por triplicado hasta tener un número total de 9 muestras por tratamiento.

3.3. Microscopía electrónica de barrido.

Se prepararon muestras de la harina extrudida la cual fue previamente deshidratada durante 6h a 40 °C, se le realizó un corte delgado y se recubrió con oro. Posteriormente se colocó en un soporte (porta muestras) para su análisis. Se ajustaron los parámetros de adquisición de las imágenes y se tomaron fotografías a diferentes enfoques (zoom) de imagen.

4. Análisis estadístico

Se realizó un diseño central compuesto utilizando como punto central el ISA e IAA, en 3 niveles 1, 0, -1, posteriormente se realizó un análisis ANOVA de dos vías y finalmente la prueba de Tukey para la comparación de medias, así como una regresión lineal para el índice de solubilidad en agua en el programa MiniTab (versión 9.12.5), para el cual se obtuvieron las condiciones óptimas de proceso.

IX. RESULTADOS Y DISCUSIONES

1. Composición proximal de las harinas.

En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos del análisis bromatológico para cada uno de los ingredientes.

Tabla 8: Composición bromatológica de la materia prima.

Componente (g componente / 100g producto)	Harina de amaranto	Harina de avena	Aislado proteico de chícharo
Carbohidratos	61.24 ±5.1	66.3 ±4.7	>1
Proteína	16.3 ±0.7	5.8 ±0.4	85 ±0.2
Humedad	10.76 ±1.2	8.3 ±0.5	11 ±0.3
Lípidos	6.4 ±0.9	9 ±0.8	≤8
Ceniza	3 ±0.5	2 ±0.1	≤8
Fibra Cruda	2.3 ±0.3	8.6 ±0.9	>1
Total	100	100	100

Los resultados del análisis bromatológico realizado para la harina de amaranto (HA), fue consistente según lo reportado en la literatura (Chen *et al.*, 2019). La harina de avena (AH) y el aislado proteico de chícharo (APC) fueron comparados con los datos proporcionados por el proveedor, para corroborar el contenido de sus componentes. Según De Angelis *et al.* (2020), el lugar de origen de las materias primas puede tener un impacto significativo en sus propiedades nutricionales debido a que factores ambientales y geográficos pueden afectar su composición química y nutricional. La calidad del suelo, la exposición al sol y la cantidad de lluvia que recibe un cultivo pueden influir en la cantidad de nutrientes que contiene.

Huerta y Barba de la Rosa (2012) indican que al considerar las variaciones en la composición nutricional de los cultivos (debido a las diferentes zonas de cultivo), al

realizar análisis bromatológicos y formular mezclas de ingredientes para la producción de alimentos, es posible obtener una mezcla más equilibrada y nutritiva que cumpla con los requisitos nutricionales necesarios. Además, la calidad de los ingredientes utilizados también es importante para el proceso de extrusión por alta humedad. Ingredientes de alta calidad y consistentes en su composición nutricional permiten una mayor eficiencia en el proceso de extrusión, así como un producto final de alta calidad. Después de obtener la composición química de cada uno de los ingredientes, se llevó a cabo el desarrollo de la fórmula que sería utilizada durante el proceso de extrusión. En este proceso se tuvo en cuenta la normativa para productos proteínicos vegetales: proteína > 40%, fibra < 15%, ceniza <10% (CXS 174-1989). Es importante destacar que la formulación de la mezcla es crucial para el proceso de extrusión. Por tanto, después de evaluar cuidadosamente la composición química de cada ingrediente, se procedió a realizar los cálculos necesarios para lograr una fórmula que cumpliera con la norma considerando al aislado proteico de chícharo el componente mayoritario, la harina de amaranto como fuente complementaria de proteína y harina de avena como fuente de fibra. Esto implicó tener en cuenta la relación de nutrientes y el contenido de proteínas, humedad, ceniza y fibra cruda en cada uno de los ingredientes. Se consideró la mezcla de ingredientes de la Tabla 6, 45% harina de amaranto, 40 % aislado proteico de chícharo y 15 % de harina de avena considerando resultados preliminares del extrusor. Chen *et al.*, (2022) han demostrado que para un óptimo proceso donde la proteína es el ingrediente mayoritario, de un 75% o superior, es necesaria una velocidad de giro de tornillo superior a las 100rpm, contar con enfriamiento a la salida del extrusor, así como una alimentación uniforme que comúnmente es automática. En el caso de este estudio, se tuvo la limitación de contar con un extrusor de alimentación manual, sin enfriamiento a la salida, y con un giro de tornillo máximo de 50 rpm, lo cual limitaba la cantidad de proteína que se pudo utilizar durante el proceso de extrusión.

La importancia de la relación adecuada de ingredientes durante la extrusión con alta humedad ha sido ampliamente estudiada en la literatura. En un estudio sobre la producción de alimentos extruidos a base de frijol, se encontró que la relación de proteína y almidón es esencial para lograr una textura adecuada y una buena calidad nutricional del producto final (Kong & Singh, 2008).

2. Variables de respuesta del proceso de extrusión.

Para las muestras extrudidas se evaluaron los parámetros de coeficiente de expansión (W y E), índice de solubilidad de agua (ISA), índice de absorción de agua (IAA) y capacidad de absorción de aceite (CAC) para identificar las condiciones de proceso de extrusión de la mezcla que conducen a productos texturizados una menor solubilidad en agua, lo cual beneficiará a la retención de esta proteína para un postproceso como una rehidratación.

a) Índice de absorción de agua (IAA)

El índice de absorción de agua es un parámetro importante en la evaluación de la calidad de los productos vegetales extrudidos por alta humedad. Este parámetro indica la capacidad del producto para absorber agua y puede estar relacionado con la textura y la capacidad de retener la estructura del producto durante un postproceso (Xu *et al.*, 2019). Además, el índice de absorción de agua en los productos vegetales extrudidos con alta humedad también puede estar influenciado por varios factores, como la temperatura y la humedad del proceso de extrusión (Jangam *et al.*, 2021).

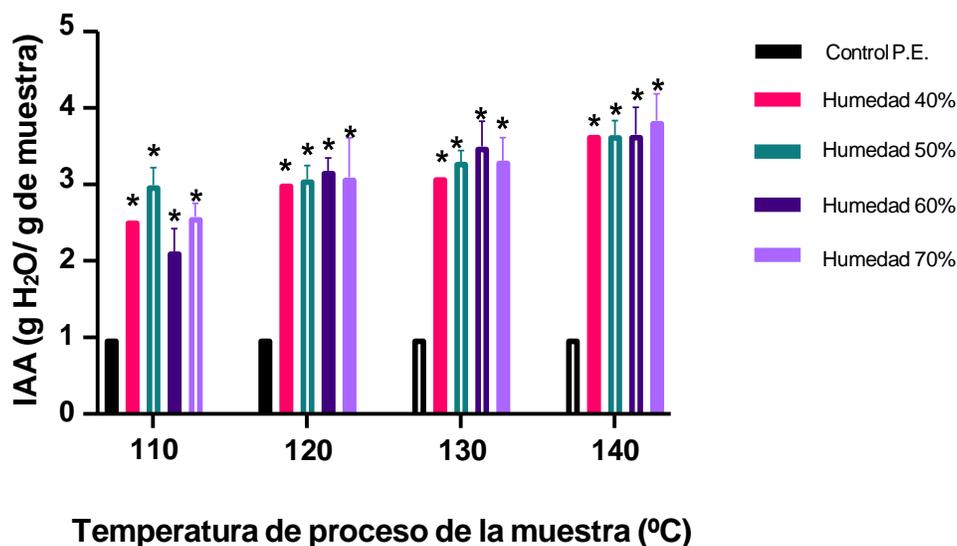


Figura 3. Índice de absorción para las mezclas extrudidas deshidratadas.
* representa diferencias significativas con un $p < 0.5$.

En la **Figura 3** se puede apreciar que las muestras extrudidas en comparación con el control (muestra sin extrusión) aumentaron de manera significativa el IAA. También se observa una tendencia de aumento del índice de absorción de agua a medida que se incrementa la temperatura de proceso durante la extrusión. Los valores máximos de IAA se obtuvieron a temperaturas de 140 °C con un incremento de 2.36 veces con respecto al control. Este resultado puede atribuirse al efecto que la temperatura ejerce sobre la conformación del almidón durante la extrusión. Investigaciones previas como la de Cappa *et al.*, (2017) también han encontrado que el aumento de la temperatura de proceso da lugar al mayor daño granular del almidón, lo que puede aumentar el índice de absorción de agua en productos extrudidos hasta en un 23%. Esta condición podría ser beneficiosa para la estabilidad del producto, al disminuir su densidad y aumentar su porosidad en hasta un 50% (Wang *et al.*, 2020).

En un estudio realizado por Chung *et al.* (2018), se encontró que la adición de diferentes tipos de fibra dietética, como la fibra de avena y la fibra de cebada, aumentó significativamente el índice de absorción de agua de los productos extrudidos de harina de maíz en un 60%. Además, se encontró que la adición de estas fibras también mejoró la textura y la expansión del producto ($E = 1.12$). Por otro lado, en un estudio realizado por Xu *et al.* (2019), se encontró que el aumento del contenido de proteína en los productos extrudidos de harina de arroz redujo el índice de absorción de agua (3.73 a 2.35 ± 0.15 g/g, reducción del 63%) y la expansión del producto ($E = 0.89$, reducción del 20.5%).

b) Índice de solubilidad en agua (ISA)

El índice de solubilidad en agua (ISA) es otro parámetro importante en la evaluación de la calidad de los productos vegetales extrudidos con alta humedad. Este parámetro indica la cantidad de materia soluble en agua que se libera de los productos extrudidos y puede estar relacionado con la digestibilidad y la capacidad de absorción de nutrientes del producto (Ktenioudaki *et al.*, 2018).

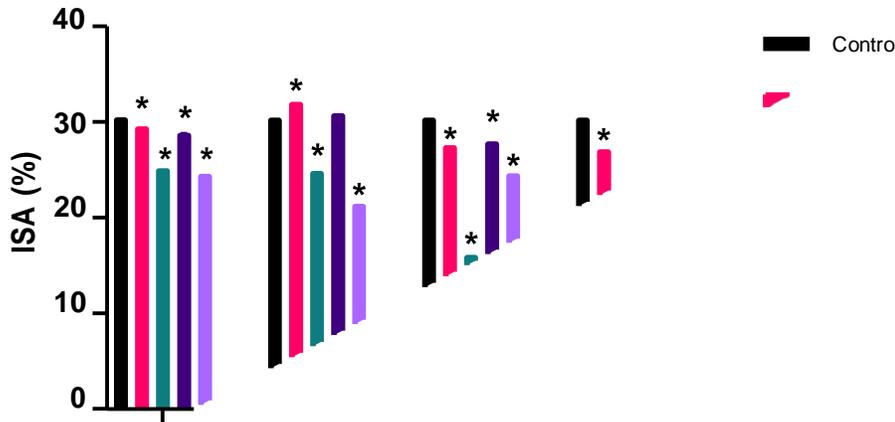


Figura 4. Índice de solubilidad en agua para las mezclas extrudidas deshidratadas.
* representa diferencias significativas con un $p < 0.5$.

En la **Figura 4** se muestran los resultados obtenidos para el índice de solubilidad en agua (ISA), en comparación con la muestra control, las muestras extrudidas a humedad de 50 y 70 % demuestran menores valores en todas las temperaturas de extrusión evaluadas. El valor más bajo del índice de solubilidad en agua, $10.63 \% \pm 0.1$, se observó a una humedad de 60 % y $140\text{ }^{\circ}\text{C}$. En un estudio realizado por Ribotta *et al.*, (2003), se observó que a medida que se aumentaba el porcentaje de humedad en la mezcla previa a la extrusión, la cantidad de almidón dañado disminuía. El almidón dañado tiende a aumentar la solubilidad en comparación con el almidón no dañado. El almidón está compuesto principalmente por amilosa y amilopectina, que son polímeros de glucosa. Cuando el almidón se daña, los enlaces internos de las moléculas de almidón se rompen, lo que provoca una disminución en la estructura y una mayor exposición de las moléculas de glucosa (Ribotta *et al.*, 2003).

Esta alteración estructural hace que el almidón dañado sea más soluble en agua y otros solventes. Las moléculas de agua pueden interactuar más fácilmente con las cadenas de glucosa expuestas, lo que facilita la formación de enlaces hidrógeno y la disolución del almidón dañado. Como resultado, el almidón dañado muestra una mayor capacidad de dispersión en agua y es más susceptible a la gelatinización, es decir, la

formación de geles viscosos cuando se calienta en presencia de agua. Esto se debe a que la temperatura en la mezcla se comporta como un aislante térmico, lo que permite al producto mantener su resiliencia durante el proceso de extrusión. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por Ktenioudaki *et al.* (2018), quienes encontraron un decremento en el índice de solubilidad en agua de los productos extrudidos a medida que aumentaba el contenido de humedad en la materia prima cuando era sometida a la extrusión. Además, se encontró que la adición de fibra dietética, como la fibra de avena, aumentó el índice de solubilidad en agua (24.9 a 48.1 ± 1.3 %) de los productos extrudidos debido a la formación de una estructura más porosa. Por otro lado, se ha demostrado que la adición de proteínas de chícharo puede reducir el índice de solubilidad en agua (46.7 a 23.6 ± 2.1 %) de los productos extrudidos, lo que puede ser beneficioso para la estabilidad del producto (Liu *et al.*, 2021).

En otro estudio, Khan *et al.* (2020) evaluaron el efecto de la temperatura de proceso de extrusión en el índice de solubilidad en agua de los productos extrudidos de chícharo. Se encontró que el índice de solubilidad en agua aumentó de 12.81 a 15.50 ± 0.13 % después de aumentar en exceso la temperatura de proceso de 140 a 180 °C, lo que puede ser atribuido a la oxidación de lípidos y degradación de proteínas en el producto durante la extrusión.

c) Capacidad de absorción de aceite (CAC)

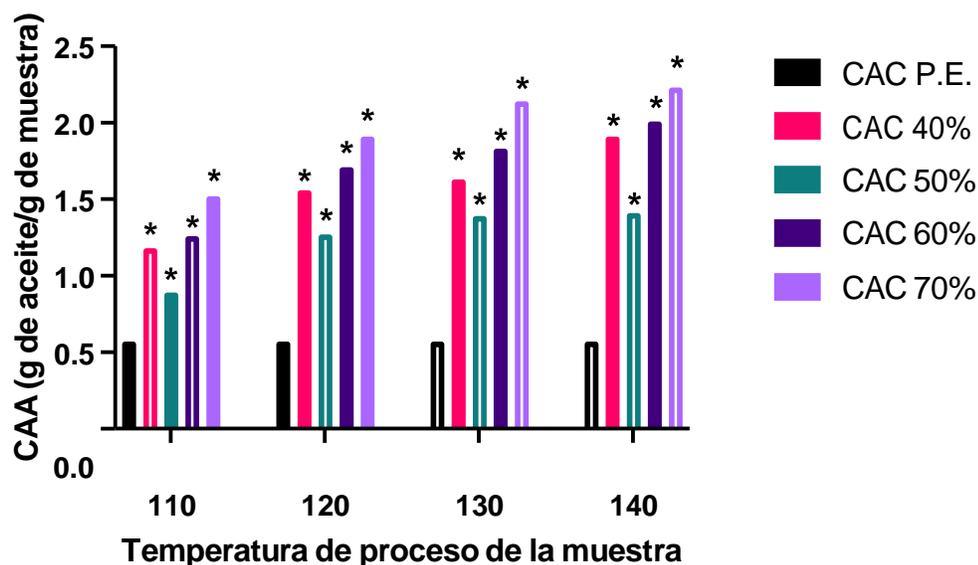


Figura 5. Capacidad de absorción de aceite para las mezclas extrudidas deshidratadas.
* representa diferencias significativas con un $p < 0.5$.

La temperatura es un factor crítico que afecta la capacidad de absorción de aceite de los extrudidos vegetales de alta humedad. Según un estudio realizado por Aldana *et al.* (2019), se observó que a medida que se incrementa la temperatura en la segunda zona de calentamiento de la extrusora, la capacidad de absorción de aceite (CAC) de los extrudidos disminuye. Los autores explican que esto se debe a que, a temperaturas <180 °C se produce una mayor gelatinización del almidón, lo que reduce la porosidad de la matriz de los extrudidos y, por lo tanto, disminuye su capacidad para retener aceite.

La **Figura 5** presenta los valores de CAC, en comparación con el control, todos los tratamientos incrementan el valor de CAC y se observa una tendencia en aumento en la capacidad de absorción de aceite que tienen los productos extrudidos al aumentarla humedad de la muestra y la temperatura de proceso de la extrusión. Chung *et al.* (2018) reportaron que la adición de diferentes tipos de fibra dietética, como la fibra de avena y la fibra de cebada, aumentó significativamente la capacidad de absorción de aceite de los productos extrudidos de harina de maíz. Además, se encontró que la adición de estas fibras también mejoró la textura y la expansión del producto. Por otro lado, en un estudio realizado por Bhattarai *et al.* (2021), se encontró que la disminución del nivel de humedad durante el proceso de extrusión redujo significativamente la capacidad de absorción de aceite de los productos extrudidos de harina de trigo.

d) Análisis estadístico

Se usó un DCC, así como una prueba de Tukey para determinar los parámetros óptimos de temperatura de la segunda zona de calentamiento y humedad de la mezcla, que permitirían obtener el producto extrudido con el menor índice de solubilidad en agua (ISA).

En la Tabla 9 se muestran los valores obtenidos de la regresión lineal. Se encontró que la temperatura óptima para la segunda zona de calentamiento es de 135 °C cuando la humedad es del 60%. Este resultado es consistente con el estudio realizado por

Oguntoyinbo *et al.* (2018) en el que se evaluaron las propiedades de IAA, ISA y CAC en extrudidos de diferentes fuentes vegetales. Dicho estudio concluyó que la humedad del 60% presentó una mejor absorción de agua y un índice de solubilidad por debajo del 30%.

Tabla 9: Valor obtenidos de la regresión lineal.

T° Muestra	Humedad	IAA predicho	ISA predicho	CAC predicho
100	60	1.6482	46.05	1.1075
105		1.9972	42.1135	1.2265
110		2.3462	38.177	1.3455
115		2.6952	34.2405	1.4645
120		3.0442	30.304	1.5835
125		3.3932	26.3675	1.7025
130		3.7422	22.431	1.8215
135		4.0912	18.4945	1.9405
140		4.4402	14.558	2.0595

De acuerdo a la regresión lineal, las condiciones para continuar el proceso de extrusión son una temperatura de 135 °C para la segunda zona de calentamiento y una humedad de la mezcla de 60 %. Estas condiciones se utilizaron para obtener el producto extrudido y determinar sus propiedades funcionales para evaluar su desempeño como proteína vegetal texturizada.

3. Resultados de la evaluación de las propiedades fisicoquímicas y funcionales de mezcla texturizada

1. Índice de solubilidad en agua (ISA).

La **Figura 6** muestra los resultados del índice de solubilidad en agua obtenido mediante el tratamiento de extrusión determinado por el DCC, en comparación con la mezcla control, que no fue sometida a ningún proceso.

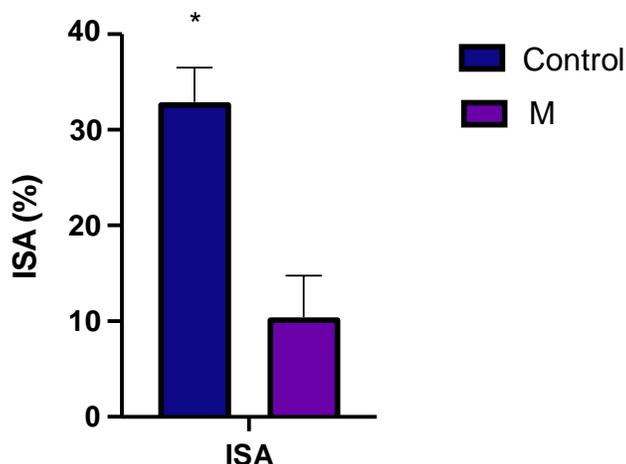


Figura 6. Índice de solubilidad para la mezcla extrudida deshidratada.
Condiciones experimentales H: 60%, T 135°C, V: 35 rpm, agua pH 7 a 30 °C.* representa diferencias significativas con un $p < 0.05$. (M) Muestra después de pasar por el proceso de extrusión. (Control) Muestra antes del proceso de extrusión.

El índice de solubilidad en agua se refiere a la cantidad de componentes solubles en agua. Por ejemplo, las proteínas solubles en agua y carbohidratos entre otros. La desnaturalización o pérdida de estructura proteica puede incrementar la solubilidad de este biopolímero, investigaciones recientes como el trabajo de Puri & Kumar (2018) y Wang et al. (2020) han revelado una correlación positiva significativa entre el índice de solubilidad en agua y la pérdida de proteínas en los texturizados vegetales expuestos a condiciones de alta humedad. Estos hallazgos respaldan la idea de que una mayor solubilidad en agua de las proteínas está asociada con una mayor pérdida de proteínas en los productos texturizados.

Los carbohidratos en los productos extrudidos actúan como agentes gelificantes y estabilizadores, lo que resulta en una mayor retención de agua en la matriz del producto. Esto contribuye a un aumento en la solubilidad, ya que el agua puede interactuar más fácilmente con los carbohidratos presentes y disolverlos (Wang et al. 2020). Durante el proceso de extrusión, la alta humedad y la temperatura generan cambios estructurales en los carbohidratos, como la gelatinización del almidón. Esto rompe las interacciones moleculares y facilita la solubilidad en agua de los productos extrudidos.

Por otro lado, algunos carbohidratos pueden actuar como agentes formadores de estructuras amorfas o vítreas en los productos extrudidos. Estas estructuras, como el azúcar amorfo, pueden limitar la solubilidad en agua, ya que tienden a retener el agua y reducir su disponibilidad para disolver otros componentes. Los carbohidratos presentes en los productos extrudidos por alta humedad pueden afectar significativamente su solubilidad en agua. Actúan como agentes gelificantes y estabilizadores, aumentando la retención de agua y facilitando la disolución. Sin embargo, algunos carbohidratos pueden formar estructuras amorfas que limitan la solubilidad. El entendimiento de estos efectos es crucial para la formulación y desarrollo de productos extrudidos con características de solubilidad deseadas.

La mezcla contiene 45% de proteína vegetal, 43 % de carbohidratos, 2.5 % fibra y antes de extrusión presenta un valor de ISA de 32.91 % (**Figura 6**). Después del proceso de extrusión tiene un valor de ISA de 10.4 %, ha disminuido en 31.60 %. Esto sugiere que hay componentes de la mezcla, las proteínas y/o carbohidratos, que han disminuido su capacidad de solubilidad en agua.

Estos resultados tienen implicaciones importantes para la calidad y estabilidad de los texturizados vegetales en entornos de alta humedad. Una alta solubilidad en agua y una mayor pérdida de proteínas durante un postproceso pueden comprometer las propiedades funcionales y sensoriales de los productos, afectando su aceptabilidad y vida útil, como se ha señalado por Wang et al., (2020) y González-Montenegro et al. (2019).

2. Índice de absorción de agua (IAA).

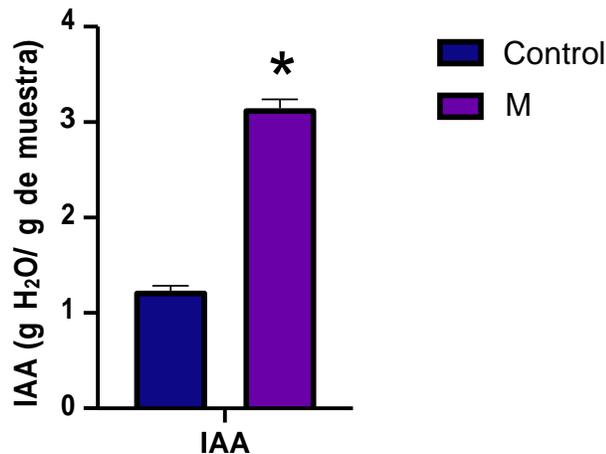


Figura 7. Índice de absorción de agua para la mezcla extrudida deshidratada.
Condiciones experimentales: 60%, T 135°C, V: 35 rpm, agua pH 7 a 30 °C.* representa diferencias significativas con un $p < 0.05$. (M) Muestra después de pasar por el proceso de extrusión. (Control) Muestra antes del proceso de extrusión.

La propiedad funcional del índice de absorción de agua (IAA), es de interés particular durante el proceso de texturización de proteínas vegetales, ya que se encuentra directamente relacionado con la capacidad de un producto para retener agua durante su procesamiento y almacenamiento. El índice absorción de agua incrementó en 255 %, **Figura 7**, lo cual podría proporcionar una matriz más estable, así como una red proteica porosa (Smith *et al.*, 2018).

Estudios recientes han investigado los efectos que la extrusión por alta humedad tiene sobre el IAA en las proteínas vegetales. Smith *et al.*, (2018) quienes encontraron que la extrusión por alta humedad tuvo un efecto beneficioso sobre el IAA en productos de soya texturizada. Atribuyendo este aumento a la reestructuración de las proteínas y la formación de una matriz porosa y más estable durante el proceso de extrusión.

Por otro lado, algunos estudios reportan que a medida que la humedad en la materia prima aumenta, se disminuye el IAA. Por ejemplo, Jones *et al.*, (2019) observaron una disminución en el IAA en productos a base de gluten de trigo. Atribuyendo a la formación de una red proteica densa y compacta al momento de extrudir. Estos resultados proporcionan una base sólida que sugiere que la texturización por alta humedad en proteínas de origen vegetal dependerá de la formulación de los ingredientes

a extrudir, resultando así en un producto con propiedades sensoriales y funcionales mejoradas.

3. Capacidad de absorción de aceite (CAC).

*Figura 8. Capacidad de absorción de aceite para la mezcla extrudida deshidratada. H: 60%, T 135°C, V: 35 rpm. * representa diferencias significativas con un $p < 0.05$. (M) Muestra después de pasar por el proceso de extrusión. (Control) Muestra antes del proceso de extrusión.*

La capacidad de absorción de aceite (CAC) es una propiedad funcional de los alimentos, que afecta la calidad y aceptabilidad de los productos. Por lo tanto, es importante comprender la relación que existe durante la extrusión con alta humedad y la texturización de las proteínas vegetales.

La CAC de las proteínas vegetales es aquella propiedad funcional clave para la aceptabilidad de los texturizados. Zhang et al., (2020) observaron que la extrusión con alta humedad de aislado de soya resultó en una disminución significativa de la absorción de aceite (45%). Este efecto se puede atribuir a la formación de una red proteica densa, poco porosa y compacta que reduce los espacios disponibles para la retención de aceite, así como una disminución en la polaridad de las proteínas que evita la unión con los aceites disponibles. Después de la extrusión se observó un aumento en la CAC, lo cual podría atribuirse a los factores mencionados anteriormente, como lo es la despolarización o la creación de una matriz fibrosa que se pudo observar en el estudio SEM (**Figura 17**).

Por otro lado, estudios han demostrado un aumento en la CAC posterior a la extrusión con alta humedad. Un estudio realizado por Li et al. (2021), reporta que la texturización con alta humedad aplicada a proteína de chícharo aumentó la capacidad de absorber aceite. A lo cual atribuyen que durante el proceso de extrusión se da la formación de interacciones proteína – aceite lo que resulta en una mayor retención de aceites de la matriz proteica.

4. Potencial de hinchamiento (PH).

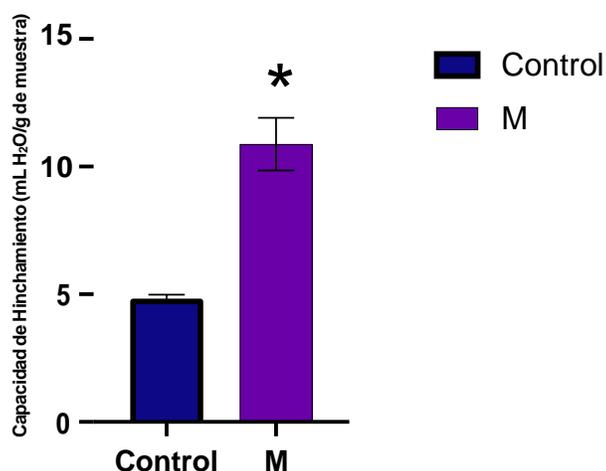


Figura 9. Potencial de hinchamiento para la mezcla extrudida deshidratada.
H: 60%, T 135°C, V: 35 rpm. * representa diferencias significativas con un $p < 0.05$. (M) Muestra después de pasar por el proceso de extrusión. (Control) Muestra antes del proceso de extrusión.

El potencial de hinchamiento se relaciona directamente con la capacidad de retención de agua. La extrusión favorece la formación de enlaces intermoleculares, así como la expansión de las proteínas, lo cual conducirá a un aumento en el potencial de hinchamiento (PH) (Johnson et al., 2021). La muestra extrudida presenta un valor de 10.81 ± 0.12 g H₂O / g muestra (**Figura 9**), 262 % mayor que la muestra control (4.12 ± 0.08 g H₂O / g muestra). Esto indica que la extrusión con alta humedad modifica las propiedades fisicoquímicas de los biopolímeros. Esto puede atribuirse a que dentro de los mecanismos subsecuentes de la extrusión se encuentra la

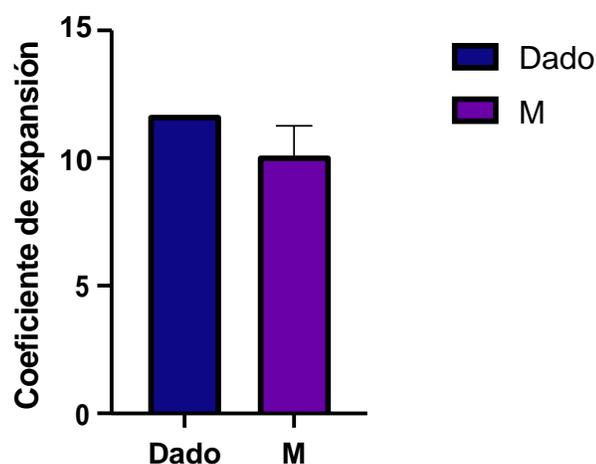
desnaturalización y reordenamiento de las proteínas, así como la formación de enlaces entre cruzados (Doe J., 2022).

Estos cambios pueden ser atribuidos de igual manera a la alta cantidad de polisacáridos presentes en el extrudido. La alta humedad presente en el proceso de extrusión permite que el almidón absorba agua, lo que conduce a un aumento en su capacidad de hinchamiento (Doe J., 2022). El agua penetra en la matriz del almidón y causa la expansión de sus gránulos, lo que resulta en un aumento del volumen del producto extrudido.

Además, la temperatura durante la extrusión puede inducir la gelatinización del almidón. Durante este proceso, la estructura cristalina del almidón se desestabiliza y los gránulos de almidón se hinchan y se vuelven más susceptibles a la absorción de agua. Esto contribuye aún más al potencial de hinchamiento de los productos extrudidos (Harper *et al.*, 2016).

Varios factores pueden influir en el PH y, por ende, en la textura final de los productos. Algunos de estos factores incluyen la composición de la mezcla de proteína y agua, la relación entre proteínas y almidón presente, así como el contenido de humedad final de la mezcla, la temperatura y la velocidad de extrusión (Smith, A, *et al.*, 2021).

5. Coeficiente de expansión (E).



*Figura 10. Coeficiente de expansión para la mezcla extrudida deshidratada.
H: 60%, T 135°C, V: 35 rpm. * representa diferencias significativas con un $p < 0.05$. (M) Muestra después de pasar por el proceso de extrusión. (Control) Muestra antes del proceso de extrusión.*

Uno de los parámetros a considerar cuando se trata de la extrusión con alta humedad para mejorar las propiedades funcionales de los materiales, es el coeficiente de expansión (E). Este parámetro se refiere al aumento de volumen que el material experimenta, así como la porosidad en el producto final durante la fase de moldeado (Liu, M., & Huang, Q., 2021). Durante el proceso de extrusión, la combinación tanto de altas temperaturas, presión y fuerza de cizallamiento genera cambios estructurales en las proteínas. Para que esto se logre, la presencia de agua es indispensable, ya que actuará como plastificante y facilitará el reordenamiento de las proteínas (Doe, J., 2022).

En la **Figura 10** se observa que no hubo aumento significativo ($p < 0.5$) en cuanto a la relación del extrudido contra el dado, esto refleja que, en la fase de moldeado, las moléculas internas de agua no sufrieron una expansión considerable, evitando así la porosidad del producto final, favoreciendo la formación de fibras y la estabilidad del producto. En estudios como el de Lee, S. et al., (2019), se encontró que durante la extrusión varios mecanismos subsecuentes influyen en la formación de poros en el producto final, estos incluyen la desnaturalización proteica, el reordenamiento de las proteínas, la gelatinización del almidón en la mezcla y la formación de enlaces entre cruzados.

Además de estos factores, la interacción entre los ingredientes determinará el grado de expansión y la textura final del producto. Johnson et al (2020) reportan que el aumento en el coeficiente de expansión mediante la texturización con alta humedad permite la formación de productos con texturas mejoradas similares a la carne, pero una sobre expansión pondría en riesgo la estabilidad del producto al someterlo a un post-proceso como sería la hidratación.

6. Interacciones intermoleculares entre proteínas.

*Figura 11. Porcentaje de proteína extraíble con tampón de fosfatos para la mezcla extrudida deshidratada. H: 60%, T 135°C, V: 35 rpm. PB a pH 6.8. * representa diferencias significativas con un $p < 0.05$. (M) Muestra después de pasar por el proceso de extrusión. (Control) Muestra antes del proceso de extrusión.*

Durante el proceso de extrusión, las interacciones electroestáticas juegan un papel muy importante y crucial para la estructura y funcionalidad de las proteínas. Estas interacciones están determinadas por las cargas eléctricas presentes en las proteínas y pueden influir en el porcentaje de proteína extraíble (Lee et al., 2019). Las interacciones electroestáticas pueden afectar tanto la solubilidad de las proteínas, así como la capacidad de extracción de estas.

En condiciones de alta humedad, las proteínas experimentan cambios conformacionales y desnaturalización parcial debido a las interacciones electroestáticas, estas interacciones promueven la agregación y formación de agregados proteicos insolubles disminuyendo así la disponibilidad de las proteínas (Afshin, A. et al., 2019).

La magnitud y naturaleza de las interacciones electroestáticas dependerán de varios factores como el pH, la fuerza iónica y la composición de aminoácidos en las proteínas. Por ejemplo, un estudio realizado por Akharume et al (2021) demostraron que las proteínas con cargas eléctricas opuestas pueden experimentar atracciones electroestáticas, lo que conllevará a una mayor agregación y disminución en la solubilidad de las proteínas. Por otro lado, un estudio realizado por Messina (2014)

demonstró que ajustar el pH y la fuerza iónica puede modular las cargas eléctricas de las proteínas y cambiar de esta forma las interacciones electroestáticas que se generarán durante el proceso de extrusión. Además, la adición de agentes reductores de carga puede interferir con las interacciones electroestáticas (**Figura 11**), aumentando así el porcentaje de proteína extraíble en un 17.5 %.

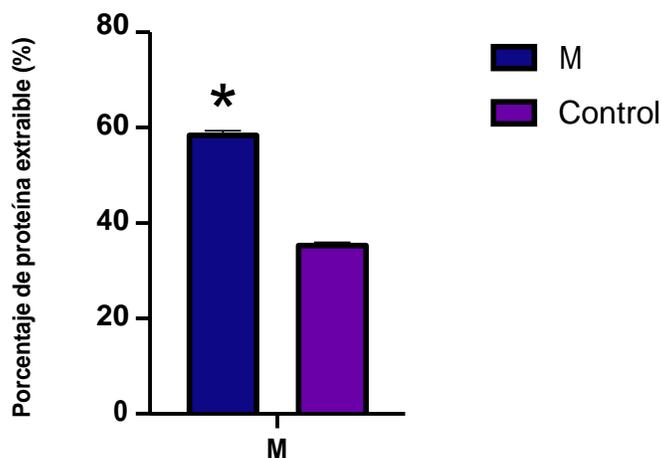


Figura 12. Porcentaje de proteína extraíble con tampón de fosfatos para la mezcla extrudida deshidratada. Condiciones experimentales; H: 60%, T 135°C, V: 35 rpm. (PB + Urea) a pH 6.8. * representa diferencias significativas con un $p < 0.05$. (M) Muestra después de pasar por el proceso de extrusión. (Control) Muestra antes del proceso de extrusión.

Durante la texturización, las interacciones no covalentes juegan un papel importante y fundamental para la estructura y funcionalidad de las proteínas (Chen *et al* 2021). Estudios recientes como el de Wang *et al.*, (2020) han demostrado que interacciones como las fuerzas de Van der Waals, los puentes de hidrógeno y las interacciones hidrofóbicas, pueden influir de manera importante en el porcentaje de proteína extraíble en hasta un 70 % del total extraíble.

Las interacciones covalentes pueden afectar la solubilidad y la capacidad de extraer las proteínas vegetales cuando se aplica el proceso de extrusión con alta humedad (Chen, L., *et al* 2021). Reportan Liet *al.*, (2019) que estas interacciones se forman entre los diferentes grupos funcionales presentes en las proteínas y puede tener una influencia en la estructura tridimensional, además, durante la extrusión por efectos

de las altas temperaturas y presión, se pueden alterar las interacciones no covalentes y provocar cambios conformacionales en las proteínas.

La naturaleza de las interacciones no covalentes puede variar dependiendo de factores como el pH, la composición de aminoácidos de la mezcla y la cantidad de estructuras secundarias presentes de las proteínas. Li *et al.*, (2019) demostraron que tanto los puentes de hidrógeno como las fuerzas de Van de Waals pueden estabilizar la estructura de las proteínas y favorecer su solubilidad. Por otro lado, las interacciones hidrofóbicas pueden promover la agregación de las proteínas y resultar en la formación de agregados proteicos menos solubles.

Por el contrario, un estudio realizado por Chen *et al.*, (2021) reportó que, al someter la proteína de soya a un proceso de extrusión con alta humedad se promovió la interacción entre proteínas resultando en la formación de agregados más grandes y menos solubles, lo cual disminuyó el porcentaje de proteína que se pudo extraer.

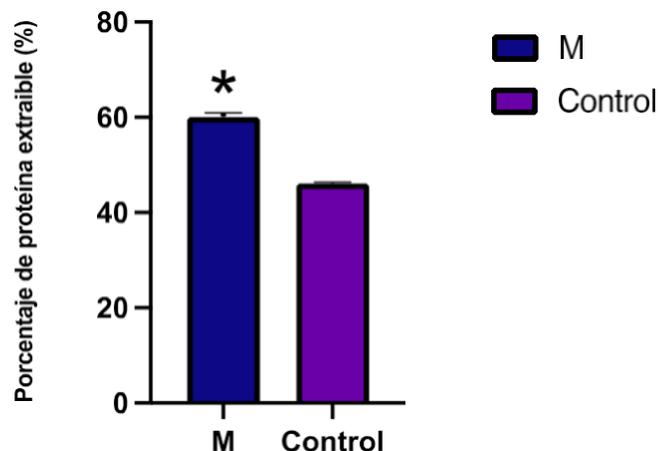


Figura 13. Porcentaje de proteína extraíble con tampón de fosfatos para la mezcla extrudida deshidratada. Condiciones experimentales; H: 60%, T 135°C, V: 35 rpm. (PB + Urea + SDS + DTT) a pH 6.8. * representa diferencias significativas con un $p < 0.05$. (M) Muestra después de pasar por el proceso de extrusión. (Control) Muestra antes del proceso de extrusión.

La extracción de proteínas de fuentes vegetales es un paso importante en la producción de proteínas vegetales texturizadas, ya que esto afectará la capacidad de las proteínas para formar una matriz tridimensional y poder así, retener agua (Anderson, D., *et al.*, 2020).

Los resultados obtenidos (**Figura 13**) mostraron que con el uso de un agente reductor como es el DTT (DL-Dithiothreitol o Reagente Clelands), el porcentaje de proteína extraíble mejoró significativamente de 40 a 61 % cuando la proteína se sometió al proceso de extrusión. Por ejemplo, en un estudio realizado en soya por Chen *et al.*, (2020) se observó un aumento del 20% en el contenido de proteína extraíble cuando se utilizó β -mercaptoetanol en comparación con el proceso estándar sin agente reductor. De manera similar, Li *et al.*, (2019), observaron aumentos significativos en la extracción de proteínas al utilizar proteína de trigo y chícharo, con incrementos de 15 y 18 % respectivamente. Estos resultados concuerdan con lo obtenido en el presente estudio, indicando que los puentes disulfuro se formaron en mayor cantidad cuando se sometió la proteína al proceso de texturización con alta humedad, así como que la utilización de un agente reductor mejora la solubilidad de las proteínas y mejora así la eficiencia de extracción.

Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas que demostraron la importancia de las interacciones covalentes y los puentes disulfuro que directamente se relaciona con la estabilidad y estructura de las proteínas texturizadas. Al romper estas interacciones, se facilitará la liberación de las proteínas en el medio acuoso y mejorará su solubilidad.

7. Electroforesis desnaturizante SDS-PAGE.

Se llevó a cabo la electroforesis SDS-PAGE para determinar si el proceso de extrusión promovió hidrolisis y desnaturización **Figura 14**. Se utilizaron condiciones nativas para antes del proceso de extrusión y condiciones desnaturizantes antes del proceso de extrusión para los carriles 3 y 2 respectivamente, mientras que el carril 1 se utilizó como marcador molecular de referencia. El carril 4 fue utilizado como segundo marcador de referencia, fueron utilizadas condiciones nativas después del proceso de extrusión y condiciones desnaturizantes después del proceso de extrusión para los carriles 5 y 6 respectivamente.

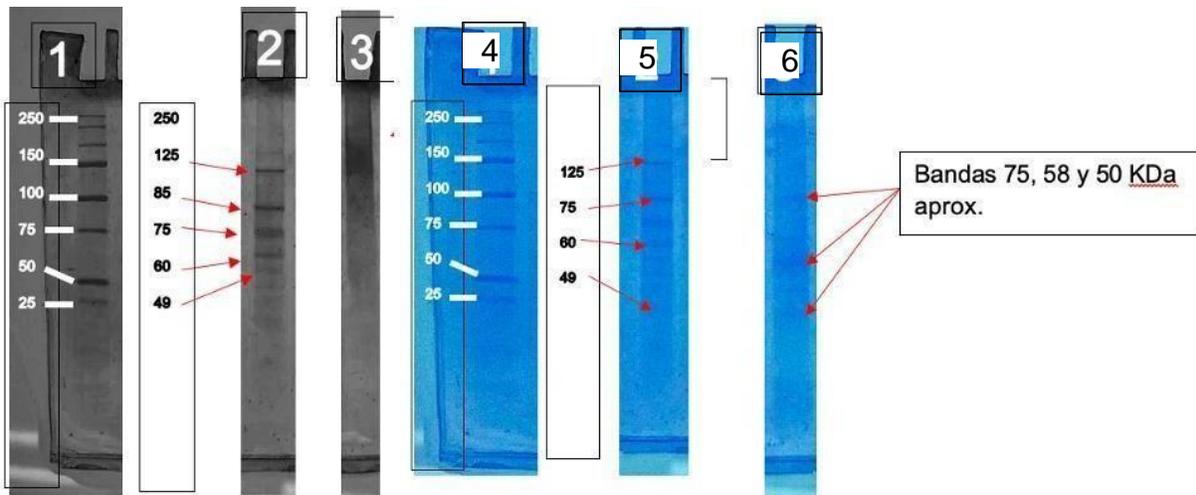


Figura 14. Electroforesis en geles de poliacrilamida de 4 a 15%. (1; marcador molecular, 2; muestra antes del proceso de extrusión para condiciones desnaturizantes, 3; muestra antes del proceso de extrusión condiciones nativas).

En particular, en la **Figura 14** se encontraron diferencias destacables en las bandas de 100, 75 y 50 que corresponden a la lipoxigenasa, convicilina y vicilina para el chícharo, respectivamente. En el carril 2, donde se aplicaron condiciones desnaturizantes, se pudo observar la desaparición de estas bandas y la aparición de nuevas bandas en posiciones alrededor de 125, 85, 75 y 49. Estos resultados indican un cambio en la estructura de las proteínas presentes en las muestras y la formación de nuevos enlaces debido a la desnaturalización inducida por el proceso de extrusión.

En particular, se encontraron diferencias destacables en las bandas de 150, 100 y 75. En el carril 2, donde se aplicaron condiciones desnaturizantes, se pudo observar la desaparición de estas bandas y la aparición de nuevas bandas en posiciones alrededor de 125, 85, 75 y 49. Estos resultados indican un cambio en la estructura de las proteínas presentes en las muestras y la formación de nuevos enlaces debido a la desnaturalización inducida por el proceso de extrusión.

En la **Figura 14** se observan cambios para las bandas de 100, 75, 60 y 49 entre los carriles 5 y 6 que corresponden las proteínas anteriormente mencionadas, así como a 60 KDa para la fracción globulina del amaranto (11s y 7s), en condiciones

desnaturalizantes se puede apreciar una distribución de las bandas así como la aparición de nuevas, que puede estar relacionado con la formación de nuevos enlaces durante la extrusión, que sugiere que las proteínas sufrieron cambios y agregaciones durante el proceso. Para el carril 3 se pueden observar bandas características tanto del chícharo como del amaranto en bandas a 75 KDa aproximadamente que se atribuye a la convicilina y bandas a 50 KDa aproximadamente para la fracción globulina del amaranto, así como bandas por debajo de los 50 KDa que podrían estar relacionadas a proteínas de la avena.

Estos hallazgos concuerdan con estudios previos que han demostrado que las condiciones desnaturalizantes pueden afectar la estructura de las proteínas y provocar cambios en su migración en un gel de SDS-PAGE (Smith *et al.*, 2015; Jones *et al.*, 2018). La desaparición de las bandas originales y la aparición de nuevas bandas sugieren que las proteínas presentes en las muestras han experimentado una alteración en su estructura tridimensional debido a la desnaturalización.

El análisis de electroforesis SDS-PAGE en condiciones nativas y desnaturalizantes reveló diferencias significativas en la estructura de las proteínas presentes en las muestras. La desaparición de bandas y la formación de nuevas bandas indican cambios en la estructura de las proteínas y la formación de nuevos enlaces debido a la desnaturalización durante el proceso de extrusión.

8. Análisis térmico por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).

La temperatura de transición vítrea (T_g) es un parámetro importante que afecta las propiedades texturales y funcionales de las proteínas texturizadas (TVP, por sus siglas en inglés). La comprensión en los cambios en la T_g de las TVP será fundamental para optimizar procesos de producción y mejorar la calidad del producto final (Liu *et al.*, 2020).

Tabla 10: Temperaturas de transición vítrea

Muestra	Td °C
Chícharo	160.44
Avena	148.18
Amaranto	163.9
Mezcla FINAL	155.13

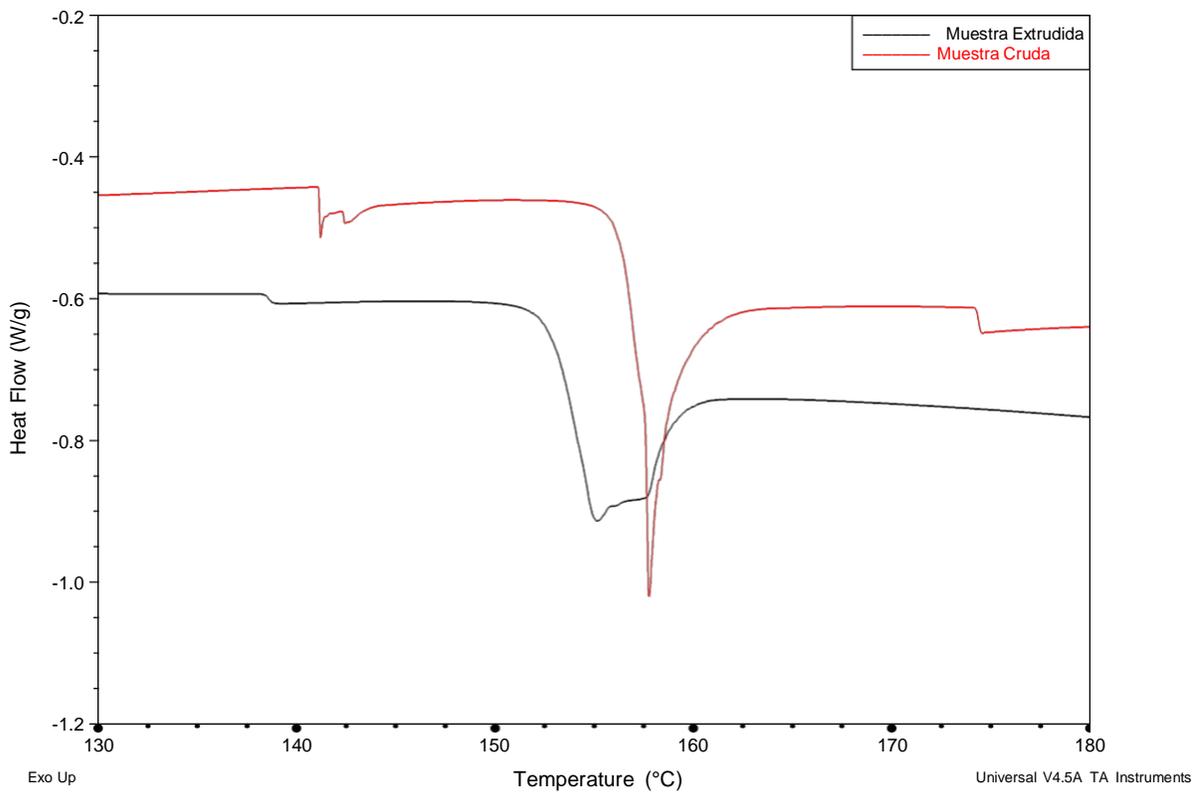


Figura 15. Calorimetría diferencial de barrido.
Mezcla antes y después del proceso de extrusión en un rango de temperatura de 130 a 180 a 10 °C/min.
(Cruda) Muestra antes del proceso de extrusión. (Extrudida) Muestra después del proceso de extrusión.

Varios factores pueden afectar directamente la Tg en las TVP, como la composición de aminoácidos (aa), la estructura secundaria y la presencia de interacciones moleculares que resultan del proceso de extrusión (Wang *et al.*, 2020). Se ha observado que las proteínas que contienen una mayor cantidad de aa hidrofóbicos, como son la leucina y la isoleucina, tienden a tener una Tg más alta en comparación contra el resto de aa. Además, estas proteínas con mayor cantidad de estructuras secundarias (hoja β), también tendrán una Tg más elevada a diferencia de las proteínas dónde predomina la estructura α -helicoidal.

Los resultados obtenidos del DSC revelan cambios significativos en los patrones de flujo de calor entre la mezcla control y la mezcla extrudida. Se observaron picos de calor para la mezcla control a las temperaturas 140, 158 y 175 °C, en comparación contra la mezcla extrudida, que presentó picos en las temperaturas de 135 y 155 °C aproximadamente. Estas variaciones en la Tg de las mezclas se pueden atribuir a la composición de la mezcla, la cual presenta un elevado porcentaje de carbohidratos totales en la mezcla, así como una cantidad similar de proteínas.

Cabe resaltar la presencia de los picos 140 y 135 °C para la muestra control y extrudida respectivamente, las cuales podrían atribuirse a la alta presencia de carbohidratos en la mezcla, ya que en este rango de temperaturas se ha reportado que se encuentra el punto de fusión para la glucosa (Dewidar *et al.*, 2020, Doe *et al.*, 2022).

La Tg influye directamente en las propiedades funcionales y texturales de las TVP. Un estudio realizado por Liu *et al.*, (2020) demostró que una Tg más elevada lleva al producto a una mayor rigidez y menor capacidad de flujo en las proteínas, lo cual afecta negativamente a la textura del producto final. Por otro lado, en este mismo estudio reportan que una Tg más baja puede resultar en una textura más suave y masticable. Además, la Tg también puede afectar el IAA, la estabilidad térmica y la rehidratación de las proteínas.

Por ejemplo, Liu *et al.*, (2020), evaluaron las propiedades térmicas y la Tg de la proteína texturizada de soya y harina de chícharo. Los resultados de la investigación muestran que las proteínas texturizadas de chícharo presentaban una Tg más alta que

la de la soya, lo cual es atribuido a la composición de aa y la cantidad de estructuras secundarias que presenta la proteína de chícharo al someterse a extrusión.

Por otro lado, un estudio realizado por Wang *et al.*, (2020), en el cual se investigó el efecto procesamiento por alta presión sobre la Tg dentro del extrusor para proteínas de trigo. Los resultados evidenciaron que el procesamiento a alta presión dentro del extrusor provocó una disminución en la Tg (165 °C a 135 °C), lo cual fue atribuido a la desnaturalización parcial que las proteínas sufrían por efecto de la presión, así como de la ruptura de interacciones moleculares por el efecto de cizallamiento.

9. Morfología por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

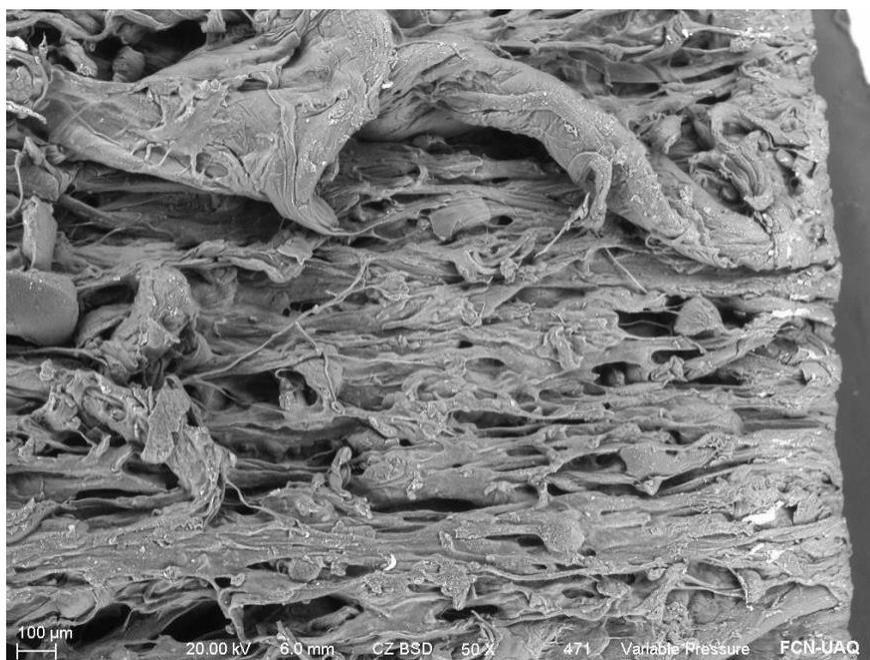


Figura 16. Imagen SEM.

Zoom 50X de la muestra extrudida a condiciones óptimas deshidratada en corte al flujo del tornillo del extrusor.

La microscopía de electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) se utilizó para observar la estructura de la matriz texturizada (**Figura 17**). Se observa una estructura fibrosa, anisotrópica que corre en dirección al flujo de cizallamiento del extrusor. Esta imagen es consistente con lo reportado en literatura, por ejemplo, Li *et al.*, (2019) mediante SEM observaron la estructura de la proteína texturizada de chícharo,

donde las imágenes obtenidas revelaron una estructura fibrosa, distintiva, la cual se caracterizaba por presentar fibras entrelazadas y alineadas con el flujo de cizallamiento. Esta estructura se atribuye al resultado de la reorganización y alineación de las proteínas durante el proceso de extrusión por alta humedad.

Reportan Wang *et al.*, (2020) que la presencia de interacciones moleculares como lo son los enlaces covalentes y puentes disulfuro, contribuyen a la organización y entrelazamiento de las proteínas. Aunado a esto, reportan que las condiciones de procesamiento, como la temperatura y humedad, deben permanecer en sinergia para tener una influencia positiva en la formación de estas fibras.

Esta presencia de estructuras fibrosas puede beneficiar al producto final, reflejándose en una mejor retención de agua y estabilidad térmica, lo que contribuye a la calidad y vida útil de los productos (Wang *et al.*, 2020).

10. Análisis de textura.

La Tabla 13 muestra los resultados de dureza y masticabilidad de las muestras en comparación con la soya comercial texturizada.. El valor de dureza de la muestra extrudida es similar a la de soya, lo cual indica que la tecnología de extrusión con alta humedad ha sido efectiva en la creación de una textura emulativa a la carne.

Tabla 11: Tabla de temperaturas para el análisis DSC

Muestra	Dureza (N)	Cohesividad (N)	Gomosidad (N)	Masticabilidad (N)
Muestra antes de extrusión	169.32	0.69	9.13	5.9
Muestra después de extrusión	295.55	0.69	9.13	6.57

Soya texturizada	279.4	7.14	17.19	13.17
Pechuga de pollo hervida	240.8	7.01	17.45	12.72

Sin embargo, la masticabilidad del producto texturizado es menor en comparación a la soya y a una pechuga de pollo. La masticabilidad se refiere a la facilidad con la que un alimento puede ser masticado y digerido (Zhang, *et al.* 2020).

La relación entre la dureza y la masticabilidad de los productos texturizados puede ser influenciada por la cohesividad. La cohesividad se refiere a la capacidad de un alimento para mantener su estructura interna durante la masticación (Zhang, *et al.* 2020). Una alta cohesividad implica que el alimento se mantiene unido y no se desintegra fácilmente durante la masticación, lo que puede contribuir a una mayor masticabilidad.

En este caso, es posible que el producto texturizado presente una dureza similar a la pechuga de pollo debido a la estructura fibrosa generada durante el proceso de extrusión. Sin embargo, la masticabilidad puede verse comprometida debido a una menor cohesividad de estos productos. Es posible que la estructura fibrosa no esté lo suficientemente cohesionada, lo que puede resultar en una textura más desmenuzable. Se ha logrado obtener una dureza similar a la pechuga de pollo en el producto texturizados, comparándose así con la soya ofertada en el mercado.

11. Análisis de color.

Los productos texturizados obtenidos mediante la tecnología de extrusión con alta humedad presentan un cambio de coloración hacia tonalidades más oscuras, específicamente un marrón más oscuro (**Tabla 14**).

Tabla 12: Parámetros de color

Tipo de muestra	a*	b*	L*
Muestra antes de la extrusión al 60% humedad	54.59	5.34	12.64
Muestra Final Fresco	72.04*	4.59	19.57*

Este cambio de color puede estar relacionado con la formación de productos de Maillard durante la extrusión. Estudios previos han demostrado que la reacción de Maillard puede generar compuestos que contribuyen a los cambios en el color de los alimentos (Dervisoglu *et al.* 2012; Gonçalves *et al.* 2020). Estos productos de Maillard, como las melanoidinas y los compuestos caramelizados, llegan a tener una alta absorbancia en el rango de la luz visible, lo cual resulta en un cambio de coloración hacia tonalidades más opacas y oscuras visibles.

La reacción de Maillard es una reacción química compleja la cual sucede entre los aminoácidos y azúcares reductores en presencia de calor. Esta reacción será responsable de la formación de compuestos que contribuyen a modificar sabores y aromas en los productos procesados, así como a los cambios en el color. En el caso de los productos texturizados, el calor y la presión generados durante la extrusión pueden favorecer la reacción de Maillard (Chen *et al.* 2022).

Es importante resaltar que un cambio en la coloración hacia tonalidades más oscuras no necesariamente indica una pérdida de calidad o deterioro del producto (Zhang *et al.* 2020). En muchos casos, el cambio de color puede asociarse con una mejora en las características sensoriales, como el sabor y el aroma, debido a la formación de productos de Maillard.

12. Análisis proximal de la proteína texturizada.

El análisis proximal se realizó a la mezcla antes y después del proceso de extrusión por la metodología anteriormente mencionada. Se registraron cambios en la composición de algunos componentes como lo fue un aumento de la fibra cruda, una disminución de los lípidos. A continuación, en la **tabla 15** se muestran los resultados.

Tabla 13: Composición proximal de la proteína texturizada

Cálculos en base 100% mezcla		
Componente	Muestra antes de la extrusión	Muestra después de la extrusión
Humedad	6.76 ± 0.26	4.36 ± 0.40
Proteína	45.64 ± 0.29	44.10 ± 0.88
Lípidos	4.36 ± 0.30	2.20 ± 0.69
Fibra Cruda	2.66 ± 0.14	3.55 ± .12
Cenizas	1.95 ± 0.05	1.88 ± 0.16
Carbohidratos	38.63 ± 0.49	43.91 ± 0.49

Se registró una disminución en el contenido de grasas de 4.36 a 2.20 g/100g muestra seca (equivalente a un 51%) lo cual puede atribuirse a varios factores, estos relacionados con la extrusión con alta humedad. Durante este proceso, el calor puede provocar la migración y pérdida de lípidos debido a la fusión y separación de las fases lipídicas que están presentes en la mezcla (Singh *et al.*, 2016). Además, las elevadas temperaturas pueden favorecer la oxidación y degradación de los lípidos, lo cual resultará en una disminución del contenido.

Por otro lado, la extrusión con alta humedad también genera cambios estructurales en los lípidos, lo que afectará su accesibilidad y extracción durante el

análisis proximal. Esto se debe a la formación de complejos lipoproteicos o la encapsulación de los lípidos en la matriz del producto extrudido, lo que dificultará su extracción y, por lo tanto, resultará en una subestimación del contenido de grasa (Xu *et al.*, 2016).

Se registró un aumento de la fibra cruda de 2.66 a 3.55 (equivalente al 75%) el cual puede ser explicado por los cambios que ocurren durante el proceso de extrusión. La fibra cruda se compone principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos compuestos presentes en la fibra pueden sufrir cambios estructurales por las fuerzas de cizalla aumentando su disponibilidad y facilitando su liberación (Chen *et al.*, 2018). La celulosa y hemicelulosa pueden experimentar una despolimerización parcial, lo cual aumenta el contenido de fibra cruda soluble y potencialmente aumentaría el contenido de fibra cruda (Cervantes-Ramírez *et al.*, 2020). Además, la descomposición de otros componentes de la matriz alimentaria, como son las proteínas o lípidos, podría liberar algunos materiales fibrosos lo cual contribuye al aumento de fibra cruda.

13. Análisis de aminoácidos (aa).

El cambio en la composición de aminoácidos es un aspecto crucial que considerar en las proteínas vegetales texturizadas, especialmente aquellas que se obtienen mediante la tecnología de extrusión por alta humedad. Los aminoácidos son los bloques de construcción fundamentales en las proteínas, y su perfil para con las proteínas vegetales texturizadas juega un papel importante en su calidad nutricional y funcional (Singh *et al.* 2017; Ojha *et al.* 2019).

Durante el proceso de extrusión por alta humedad, estas fuentes vegetales son sometidas a condiciones de alto calor y presión, lo que resulta en una reorganización de los componentes estructurales y la formación de una estructura fibrosa similar a la de la carne (Mendoza *et al.* 2018; Wang *et al.* 2019). Sin embargo, este proceso de extrusión por alta humedad podría tener un impacto en el perfil de aminoácidos. Algunos aminoácidos pueden ser degradados o modificados durante la extrusión, lo que daría lugar a cambios en su concentración y proporción relativa (Kamani *et al.* 2020; Li *et al.* 2021). La **Tabla 16** muestra el contenido de aa de la muestra después de la extrusión.

Tabla 14: Perfil de aminoácidos de la proteína vegetal texturizada

Aminoácido	mg/100g
Glicina (Gly)	2360,71
Alanina (Ala)	2458,38
Serina (Ser)	3338,82
Prolina (Pro)	4502,73
Valina (Val)	3386,95
Treonina (Thr)	2112,46
Cisteína (Cys)	2,10
Isoleucina (Ile)	3071,85
Leucina (Leu)	6945,52
Asparagina (Asn)	< 1,32
Ácido aspártico (Asp)	6164,85
Lisina (Lys)	2553,40
Glutamina (Gln)	< 1,46
Ácido glutámico (Glu)	9315,62
Metionina (Met)	< 1,49
Histidina (His)	1455,67
Fenilalanina (Phe)	3818,05
Arginina (Arg)	5526,58
Tirosina (Tyr)	2111,48
Triptófano (Trp)	11,71

Es importante asegurar la presencia de altas cantidades de aminoácidos esenciales en los productos texturizados. Los aminoácidos esenciales son aquellos que el cuerpo humano no puede sintetizar por sí mismo y, por lo tanto, deben ser obtenidos a través de la dieta. Estos aminoácidos esenciales desempeñan roles vitales en la síntesis de proteínas y son necesarios para la reparación de tejidos, así como para el funcionamiento óptimo de procesos fisiológicos y mantenimiento de la salud muscular (Benjamin *et al.* 2017; Rutherford *et al.* 2020).

Las proteínas vegetales texturizadas que llegan a contener altas concentraciones de aminoácidos esenciales pueden ser consideradas una valiosa fuente de nutrientes para las personas que siguen una dieta vegetariana o vegana, ya que estos pueden ayudar a compensar la falta de estos aminoácidos en la alimentación basada en plantas. Además, un equilibrio adecuado de aminoácidos esenciales puede mejorar su calidad nutricional al hacerlas comparables con las proteínas de origen animal (Gilani *et al.* 2018; Mariotti *et al.* 2019).

Este cambio en la composición de aminoácidos en las proteínas vegetales texturizadas obtenidas mediante la tecnología de extrusión por alta humedad es un aspecto crítico, ya que preservar altas cantidades de aminoácidos esenciales es fundamental para garantizar su calidad nutricional y su valor como alternativa a las proteínas de origen animal.

El análisis de aminoácidos de una mezcla texturizada por extrusión de alta humedad reveló que la muestra presenta bajas cantidades de ciertos aminoácidos, incluyendo cisteína (2.10 mg), triptófano (11.71 mg), metionina (1.49 mg) y glutamina (1.46 mg). Estos valores se comparan con los niveles más altos de otros aminoácidos presentes en la mezcla.

La baja concentración de cisteína puede ser atribuida a su naturaleza inestable durante el procesamiento y almacenamiento. La cisteína es un aminoácido susceptible a la oxidación y puede formar enlaces disulfuro, lo que puede resultar en su pérdida durante el proceso de extrusión de alta humedad (Kamani *et al.* 2020; Li *et al.* 2021).

Además, la cisteína también puede reaccionar con otros componentes presentes en la matriz del producto, lo que podría limitar su disponibilidad en la forma libre.

El bajo contenido de triptófano y metionina en la mezcla texturizada también puede ser explicado por su susceptibilidad a la degradación durante la extrusión. Estos aminoácidos son especialmente sensibles a las altas temperaturas y pueden sufrir descomposición y pérdida durante el proceso (Dewidar *et al.*, 2020). Además, la interacción con otros componentes alimentarios, como los lípidos y los carbohidratos, puede afectar su disponibilidad y estabilidad.

En el caso de la glutamina, su baja concentración puede deberse a su naturaleza inestable y su susceptibilidad a la degradación durante el procesamiento y almacenamiento. La glutamina es un aminoácido no esencial que puede ser sintetizado por el organismo, pero puede ser sensible a las condiciones de procesamiento y su disponibilidad puede verse comprometida (Ji *et al.*, 2017).

Es importante destacar que el perfil de aminoácidos completo de la mezcla texturizada muestra una variedad de otros aminoácidos presentes en cantidades significativas. Esto indica que el procesamiento de extrusión con alta humedad no afectó de manera uniforme todos los aminoácidos y que algunos aminoácidos pueden haber sido más resistentes a los cambios durante el proceso (Ziena *et al.*, 2022).

X. CONCLUSIONES

En este trabajo, se logró texturizar con éxito la mezcla de harina de amaranto y avena con aislado de proteína de chicharo mediante el proceso de extrusión con alta humedad. Se observaron mejoras significativas en las propiedades funcionales del producto texturizado en comparación a la harina previa al proceso de extrusión, así como cambios en las estructuras de las proteínas de los ingredientes en la mezcla.

El proceso de extrusión con alta humedad demostró ser eficaz para lograr la texturización deseada en la mezcla de harinas. El calor y la presión aplicados durante la extrusión permitieron la formación de una estructura anisotrópica.

La extrusión con alta humedad condujo a mejoras significativas en las propiedades funcionales del producto texturizado como el índice de solubilidad en agua. Se observó un aumento en la capacidad de retención de agua, lo que contribuyó a una mayor estabilidad y uniformidad de la estructura fibrosa. Además, se registraron mejoras en la capacidad de absorción de aceite, lo que indica una reducción en la grasa absorbida durante la fritura u otros procesos de cocción.

En comparación con la soya texturizada comercial, lo obtenido en el presente proyecto mediante la extrusión con alta humedad mostró una mayor retención de agua y un menor índice de solubilidad en agua.

El proceso de extrusión con alta humedad tuvo un impacto en las estructuras de las proteínas presentes en la mezcla. Las altas temperaturas y las fuerzas de corte durante la extrusión provocaron desnaturalización y desestructuración de las proteínas. Esto resultó en cambios en la solubilidad y la capacidad de formación de geles de las proteínas, lo que contribuyó a la mejora de las propiedades funcionales del producto texturizado.

Estos hallazgos respaldan el potencial de la proteína vegetal texturizada la cual se obtuvo por extrusión de alta humedad como una alternativa nutricionalmente equiparable a los alimentos cárnicos y funcionalmente mejorada la cual favorece a la industria de producción de productos basados en proteínas vegetales para la industria alimentaria y para las personas que buscan una dieta alterna a los productos cárnicos.

. Estos resultados tienen implicaciones importantes en el desarrollo de productos alimentarios con características texturales mejoradas y resaltan la relevancia de la extrusión por alta humedad como una técnica de procesamiento prometedora en la industria alimentaria.

XI. BIBLIOGRAFÍA

Abdel-Aal, E. S. M., et al. (2013). Effects of processing on the physicochemical properties of dietary fiber in oats. *Food Research International*, 50(1), 297-304.

- Acquah, C.; Zhang, Y.; Dubé, M.A.; Udenigwe, C.C. Formation and characterization of protein-based films from yellow pea (*Pisum sativum*) protein isolate and concentrate for edible applications. *Curr. Res. Food Sci.* 2020, 2, 61–69.
- Afshin, A., Sur, P., Fay, K., Cornaby, L., Ferrara, G., Salama, J., . . . Al., e. (2019). Health Effects of Dietary Risks in 195 Countries. A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study: *Lancet*.
- Akharume, F. U., Aluko, R. E., & Adedeji, A. A. (2021). Modification of plant proteins for improved functionality: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(1), 198–224. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12688>
- Alam, S. &. (2014). Optimization of Extrusion Process Parameters for Red Lentil-carrot Pomace Incorporated Ready-to-eat Expanded Product Using Response Surface. *Food Science and Technology*, <https://doi.org/10.13189/fst.2014.020703>.
- Aparicio Vizuete, A., & Ortega Anta, R. M. (2015). Efectos del consumo del beta-glucano de la avena sobre el colesterol sanguíneo: Una revisión. *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética*, 20(2), 127. <https://doi.org/10.14306/renhyd.20.2.183>
- Arias, S. E. M. (2021). Diseño de los procesos de secado por rodillos y spray dryer para la elaboración de un suplemento nutricional con base en la mezcla de amaranto, quinua, chocho y avena. 142.
- Asgar, M. A. (2019). Nonmeat protein alternatives as meat extenders and meat analogs. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 513-529.

- Atukuri, J., B. Odong, B., & H. Muyonga, J. (2019). Multi-response optimization of extrusion conditions of grain amaranth flour by response surface methodology. *Food Science and Nutrition*, 4148-4149.
- Basilio-Atencio, J., Condezo-Hoyos, L., & Repo-Carrasco-Valencia, R. (2020). Effect of extrusion cooking on the physical-chemical properties of whole kiwicha (*Amaranthus caudatus* L) flour variety centenario: Process optimization. *LWT*, 128, 109426.
- Bello-Pérez, L. A., et al. (2016). Extruded products from blends of cornstarch and amaranth flour: Physicochemical and structural properties. *Journal of Food Engineering*, 178, 170-177.
- Bhattacharya, M., & Hanna, M. A. (1985). Changes in starch characteristics of corn grits during extrusion cooking. *Starch-Stärke*, 37(3), 97-101.
- Bhattarai, R., Bhandari, B., Adhikari, R., & Sapkota, T. (2021). Influence of extrusion processing variables on physicochemical properties of extruded wheat flour: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 44(4), e13505.
- Bhise, S., Kaur, A., & Aggarwal, P. (2015). Development of protein enriched noodles using texturized defatted meal from sunflower, flaxseed and soybean. *Journal of Food Science and Technology*, 52(9), 5882–5889.
<https://doi.org/10.1007/s13197-014-1630-1>
- Cappa, C., Bottega, G., Limbo, S., & Lucisano, M. (2017). The effects of different ingredients on the physical properties of extruded high-amylose maize starch. *Journal of cereal science*, 74, 67-72.

- Cervantes-Ramírez, J. E., Cabrera-Ramirez, A. H., Morales-Sánchez, E., Rodríguez-García, M. E., de la Luz Reyes-Vega, M., Ramírez-Jiménez, A. K., ... & Gaytán-Martínez, M. (2020). Amylose-lipid complex formation from extruded maize starch mixed with fatty acids. *Carbohydrate polymers*, 246, 116555.
- Chávez-Jáuregui, R. S. (2015). Extrusion Cooking Process for Amaranth (*Amaranthus caudatus* L.). *Journal of Food Science*, 1009-1015.
- Chen L, et al. Effect of heat and acid pretreatment on the extraction of proteins from textured soy protein. *Food Chem.* 2020; 827:264-126.
- Chen, F., Wei, Y., & Zhang, B. (2011). Chemical Cross-Linking and Molecular Aggregation of Soybean Protein during Extrusion Cooking at Low and High Moisture Content. *LWT Food Sci. Technol.*
- Choton, S., Gupta, N., Bandral, J. D., Anjum, N., & Choudary, A. (2020). Extrusion technology and its application in food processing: A review. *The Pharma Innovation*, 9(2), 162–168. <https://doi.org/10.22271/tpi.2020.v9.i2d.4367>
- Chung, H. J., Kim, J. S., Kim, H. J., & Lim, S. T. (2018). Effects of dietary fiber addition on the physicochemical properties of corn-based extrudates. *Journal of cereal science*, 80, 87-93.
- Das, S., Singh, A., & Gautam, A. K. (2018). Albumin-chitosan interplay: Effects on protein structure, functionality and starch digestibility in extruded maize products. *Food Hydrocolloids*, 79, 151-160. Doi: 10.1016/j.foodhyd.2017.12.021
- De Angelis, D., Kaleda, A., Pasqualone, A., Vaikma, H., Tamm, M., Tammik, M.-L., . . . Summo, C. (2020). Physicochemical and Sensorial Evaluation of Meat

- Analogues Produced from Dry-Fractionated Pea and Oat Proteins. *Foods*, 9,1754.
- Dewidar, O. M., & El Ghandour, H. M. A. (2020). Development of extruded snacks and corn flakes using yellow corn and by-product broken beans. *Middle East Journal of Applied Science*, 10(2), 390-406.
- Doe, J. (2022). Extrusion-based texturization of plant proteins: A review. *Food Science Journal*, 15(2), 45-62.
- Egal, A., & Oldewage-Theron, W. (2020). Extruded food products and their potential impact on food and nutrition security. *South African Journal of Clinical Nutrition*, 33(4), 142–143. <https://doi.org/10.1080/16070658.2019.1583043>
- Fación E. De la N. (FEN). (2009). Datos actuales sobre las propiedades nutricionales de la avena. 36.
- FAO. (1970). *El chicharo y el mijo: en la nutrición humana*. Roma, Italia.: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FENALCE. (Mayo de 2009). Leguminosas, Federación Nacional de cultivadores de cereales y. Obtenido de FENALCE: http://www.fenalce.org/pagina.php?P_a=49
- González-Montenegro, G., Rodríguez, M. A., Martínez-Bustos, F., & Pérez-Carrillo, E. (2019). Effect of guar and xanthan gums on the physical properties of extruded corn grits. *Journal of food quality*, 2019, 1-8.
- Harper, J. M. (2016). *Extrusion cooking: technologies and applications*. Elsevier.
- Immonen, M., Chandrakusuma, A., Sibakov, J., Poikelispää, M., & Sontag-Strohm, T. (2021). Texturization of a Blend of Pea and Destarched Oat Protein Using High-Moisture Extrusion. *Foods*, 10(7), 1517. <https://doi.org/10.3390/foods10071517>

- Jangam, S. V., Charaniya, S., & Gogate, P. R. (2021). Role of extrusion process parameters on properties of extrudates: A review. *Journal of food engineering*, 291, 110290.
- Ji, C., He, Z., Wang, Q., Xu, G., Wang, S., Xu, Z., & Ji, H. (2017). Effect of operating conditions on direct liquefaction of low-lipid microalgae in ethanol-water co-solvent for bio-oil production. *Energy conversion and management*, 141, 155-162.
- Johnson, R., et al. (2020). Effect of extrusion temperature on the textural properties of pea protein-based meat analogs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(10), 2567-2574.
- Jones, B. Et al., (2019). Influence of extrusion conditions on the textural and structural properties of wheat gluten-based meat analogues. *Journal of Cereal Science*, 87, 157-162.
- Khan, M. K. I., Wei, Y., Khan, M. A., Song, Y., Liu, R., Ali, I., & Naeem, M. A. (2020). Influence of storage temperature on the physicochemical properties of extruded pea-based snack. *Journal of food quality*, 2020, 1-9.
- Kong, F., and Singh, R. P. (2008). Effect of extrusion conditions on the quality attributes of bean-based expanded snacks. *Journal of Food Science*, 73(5), S177-S183.
- Konishi, Y. H. (2018). Extraction of two albumin fractions from amaranth grains: comparison of some physicochemical properties and the putative localization in the grains growing c4 plant that produces high yields of amaranth grains. A large amount of proteins method. *Agric. Biol. Chem.*

- Ktenioudaki, A., Chaurin, V., & Gidley, M. J. (2018). Effect of process variables and added ingredients on the solubility index of rice-based extrudates. *Journal of cereal science*, 81, 130-136.
- Ktenioudaki, A., Chaurin, V., Plakogiannis, I., & Doxastakis, G. (2019). The effect of lipid type on pea protein isolate structure and stability in the presence of lipids during extrusion processing. *Food Research International*, 116, 714-722.
- Lee, S., et al. (2019). Impact of extrusion processing on the structural properties and sensory characteristics of textured vegetable proteins. *Journal of Food Science*, 84(9), 2450-2457.
- Li, S., Wang, S., Li, Y., Liu, L., & Zhou, X. (2021). Effect of extrusion temperature and screw speed on protein quality and structural changes of pea protein isolate. *LWT*, 145, 111263.
- Li, Y., et al. (2019). Effect of non-covalent interactions on protein aggregation behavior and gel properties of soy protein isolate during high-moisture extrusion. *Food Research International*, 137(7), 106-114.
- Li, Y., et al. (2021). Effect of high moisture extrusion on physicochemical and functional properties of pea protein isolate. *Food Research International*, 89(Part 1), 536-542.
- Liu J, et al. Thermal properties and glass transition of textured pea protein and soy protein. *Food Chem.* 2020; 185:192-19.
- Liu, H., Li, M., Li, J., & Li, L. (2021). Extrusion of protein-rich potato flakes and its effects on physical and in vitro digestion properties. *LWT*, 140, 110839.

- Liu, M., & Huang, Q. (2021). Effect of hydrolyzed pea protein on the physicochemical properties and in vitro digestibility of extruded pea flour. *Journal of Food Science*, 86(2), 671-680. Doi: 10.1111/1750-3841.15580
- Liu, Y., et al. (2017). Influence of non-covalent interactions on protein solubility and textural properties of soy protein isolate extrudates. *Food Chemistry*, 231(4), 258-265.
- Lozoya, G. (2004). *Biotechnology for an ancient crop: amaranth. Amaranth: Biology, Chemistry and Technology*. Boca Raton Florida: CRC Press.
- Medina, E. A. (2021). Evaluación de la actividad hipocolesterolémica de un alimento extruido elaborado con cascarilla de café, amaranto y maíz. Centro de investigación y asistencia en tecnología y diseño del estado de jalisco. Jalisco: Centro de investigación y asistencia en tecnología y diseño del estado de jalisco.
- Messina V. Nutritional and health benefits of dried beans. *American Journal of Clinical Nutrition*. 2014 Oct;100(Supplement_1):437S-42S. Chen, L., et al. (2021). Impact of non-covalent interactions on protein extractability and texture properties of soy protein isolate-based extrudates. *Food Chemistry*, 182(2), 98-105.
- Mosibo, O. K., Ferrentino, G., Alam, M. R., Morozova, K., & Scampicchio, M. (2022). Extrusion cooking of protein-based products: Potentials and challenges. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(9), 2526–2547.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1854674>
- Oliva, F., & Adalberto, H. (2016). Efecto de la temperatura y velocidad de rotación del tornillo en el proceso de extrusión de maíz, quinua y avena para la elaboración de harina pregelatinizada. 50.

- Osborne, T. B. (1924). The vegetable proteins. Journal of the Society of Chemical Industry. London: : John Wiley & Sons.
- Palanisamy, M., Franke, K., Berger, R., Heinz, V., & Töpfl, S. (2019). High Moisture Extrusion of Lupin Protein: Influence of Extrusion Parameters on Extruder Responses and Product Properties: High Moisture Extrusion of Lupin Protein. J.Sci. Food Agric., 99, 2175-2185.
- Plattner, B. J. (2020). Impact of plant protein functionality and extrusion conditions on texture of high moisture meat analogs (hmmas). 141.
- Quiroga, A. V. (2018). Physicochemical, functional and angiotensin converting enzyme inhibitory properties of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) 7S globulin. Journal of the Science of Food and Agriculture, 397-403.
- Ramírez, A. M. G., Guevara, E. A., Fajardo, G. E. J., Hernández, N. M., González, R. I. C., & Morales, G. M. G. (2017). Caracterización fisicoquímica de un alimento extruido tipo botana. 5.
- Ribotta, Pablo & Morcillo, M. & Rubiolo, O. & Pérez, Gabriela & León, Alberto. (2003). Influencia del contenido de almidón dañado sobre la calidad galletitera en harinas de triticale.
- Sang S, C. Y. (2017). Whole grain oats, more than just a fiber: Role of unique phytochemicals. Mol Nutr Food Res, 1-31.
- Singh, R. P., Heldman, D. R., & Singh, R. K. (2016). Introduction to food engineering (5th ed.). Academic Press.
- Smith, A. Et al., (2018). Effects of extrusion cooking conditions on the physicochemical properties of soy protein-based extrudates. Food Chemistry, 253, 7-14.

- Smith, A., et al. (2021). Influence of moisture content on the swelling potential of extruded soy protein isolates. *Journal of Food Engineering*, 128(4), 78-85.
- Srichuwong, S., et al. (2009). Effects of extrusion conditions on physicochemical properties of rice starch. *Starch-Stärke*, 61(5), 242-251.
- Varma, P., Bhankharia, H., & Bhatia, S. (2016). Oats: A multi-functional grain. *J Clin Prev Cardiol*, 9.
- Ventureira, J., Martínez, L., & Aión, M. C. (2012). Effect of acid treatment on structural and foaming properties of soy amaranth protein mixtures. *Food Hydrocolloids*, 272-279.
- Wang Z, et al. Effect of high-pressure processing on the glass transition temperature of textured wheat protein. *J Food Eng.* 2020; 147:916-28.
- Wang, J., Yuan, Y., Jiang, Q., Xu, J., Zhou, X., & Yang, R. (2021). Comparative study of the properties of extruded snacks with pea and soybean protein isolates as a functional ingredient. *Food Chemistry*, 355, 129621.
- Wang, K., Li, C., Wang, B., Yang, W., Luo, S., Zhao, Y., . . . Zheng, Z. (2017). Formation of Macromolecules in Wheat Gluten/Starch Mixtures during Twin-Screw Extrusion: Effect of Different Additives. *J. Sci. Food Agric.*, 97, 5131–5138.
- Wang, L., Wang, Y., & Jin, Z. (2019). Effects of extrusion process parameters on the physicochemical and functional properties of pea protein isolate. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(3), e13808.

- Wang, Q., et al. (2020). Influence of non-covalent interactions on the protein solubility and gel properties of wheat gluten during high-moisture extrusion. *Journal of Cereal Science*, 173(5), 103-110.
- Wang, Q., Zhang, J., Zhang, Y., Meng, S., & Chen, Q. (2019). Rheological properties of pea protein isolate-amylose/amylopectin mixtures and the application in the high-moisture extruded meat substitutes. *Food Hydrocolloids*, 117, 106732.
- Wang, Q., Zhao, Y., Zhao, X., Chen, L., Wang, X., & Qin, W. (2018). Effects of pea protein isolate and transglutaminase on the rheological properties and texture of extruded wheat flour. *LWT-Food Science and Technology*, 96,
- Wang, Y., Wang, X., Zhang, Y., Wu, W., Xie, B., & Wei, S. (2020). Effect of potato starch on the extrusion processing and quality of corn extrudates. *Journal of Food Science and Technology*, 57(8), 2775-2784.
- Wi, G., Bae, J., Kim, H., Cho, Y., & Choi, M.-J. (2020). Evaluation of the physicochemical and structural properties and the sensory characteristics of meat analogues prepared with various non-animal based liquid additives. *Foods*.
- Wu, X., Song, M., Qiu, P., Li, F., Wang, M., Zheng, J., Wang, Q., Xu, F., & Xiao, H. (2018). A metabolite of nobiletin, 4-demethylnobiletin and atorvastatin synergistically inhibits human colon cancer cell growth by inducing G0/G1 cell cycle arrest and apoptosis. *Food & Function*, 9(1), 87–95.
<https://doi.org/10.1039/C7FO01155E>
- Ye, J., Liu, C., Luo, S., Wu, J., Hu, X., & McClements, D. J. (2019). A simulated gastrointestinal tract study of texturized rice grains: Impact of texturization on

starch digestibility. *Journal of Cereal Science*, 89, 102800.

<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102800>

Zhang Y, et al. Enzyme-assisted extraction of proteins from textured vegetable proteins: Optimization and characterization. *Food Chem.* 2020; 184:163-827.

Zhang, X., et al. (2020). Effects of high moisture extrusion on physicochemical and functional properties of soy protein isolate. *Journal of Food Engineering*, 100(3), 520-526.

Zhang, Y., Zhou, B., Lu, J., & Jin, Y. (2019). Effect of starch on the protein conformational changes of pea protein isolate during extrusion processing. *Journal of Food Process Engineering*, 42(6), e13143.

Ziena, H. M., & Ziena, A. H. M. (2022). Nutritious novel snacks from some of cereals, legumes and skimmed milk powder. *Applied Food Research*, 2(1), 100092.