

Funcionalidad de texturizados comerciales de proteína vegetal: idoneidad para elaborar análogos de carne tipo hamburguesa

Darío Alonso Cornejo-Burgos¹ (<https://orcid.org/0009-0001-3202-5670>)

María del Carmen Granados-Nevárez² (<http://orcid.org/0000-0002-1661-3608>)

Francisco Vásquez-Lara² (<https://orcid.org/0000-0003-2197-6507>)

Alma Rosa Islas-Rubio² (<https://orcid.org/0000-0002-8449-4065>)

Nina Gisella Heredia-Sandoval^{2*} (<http://orcid.org/0000-0002-8339-9082>)

¹Instituto Tecnológico Nacional de México. Blvd. Juan de Dios Batiz y Belisario Domínguez, Los Mochis, Sinaloa, C. P. 81259, México.

²Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal. Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas, núm. 46. Hermosillo, Sonora, C. P. 83304, México.

*Autor para correspondencia: nina.heredia@ciad.mx; aslas@ciad.mx, tel. (+52) 662 289 2407, ext. 435.

Resumen

Introducción: El interés creciente por los análogos cárnicos ha impulsado el aprovechamiento de proteínas vegetales, como cereales y leguminosas, para desarrollar productos con características tecnológicas y nutricionales comparables a las de la carne.

Objetivo: Caracterizar las propiedades funcionales de tres texturizados comerciales, dos de soya (TS1 y TS2) y uno de chícharo (TC), y determinar su desempeño en la elaboración de análogos de carne de res (CR) tipo hamburguesa.

Metodología: Se determinaron la composición química, perfil de aminoácidos (PA), capacidad de absorción de agua (CAA) y aceite (CAO), concentración mínima de gelificación (CMG), actividad y estabilidad emulsificante (AE y EE, respectivamente), y perfil de solubilidad proteica (PSP) de los tres texturizados. Posteriormente, se formularon hamburguesas análogas y se compararon con una hamburguesa de CR y con un análogo comercial (AC) en cuanto a color y perfil de textura (PT).

Resultados: TS1 y TS2 presentaron menor contenido proteico y mayor contenido de ceniza que TC. Los aminoácidos predominantes fueron el ácido glutámico y el aspártico, mientras que la metionina fue el limitante. Todos los texturizados mostraron menor PSP a pH 4 y mayor a pH 10, así como valores similares de CAA, CAO y CMG ($p > 0.05$). TC presentó mayor AE y EE. En las hamburguesas, TS2 y TC mostraron valores de luminosidad (L^*) similares a los de CR. No hubo diferencias significativas en los parámetros de PT, excepto en el AC.

Originalidad: Se relaciona la funcionalidad de texturizados vegetales con su desempeño como análogos cárnicos.

Limitaciones del estudio: No se realizó una evaluación sensorial de los productos.

Conclusión: Los texturizados vegetales presentaron propiedades funcionales aptas para la elaboración de hamburguesas análogas.

Palabras clave: chícharo, hamburguesas análogas, soya, texturizados.

Introducción

La carne es una fuente importante de proteínas de alto valor biológico, así como de vitaminas y minerales (Klurfeld, 2018). Sin embargo, las tendencias de consumo reflejan un interés por reducir la dependencia de los alimentos de origen animal debido a consideraciones ambientales, éticas y de salud (Bryant & Barnett, 2020; OECD/FAO, 2024). Aunque se prevé que el consumo de proteína cárnica aumente 12 % para 2033 (OECD/FAO, 2024), el crecimiento de la población mundial, que podría alcanzar 10.3 mil millones de habitantes hacia mediados de la década de 2080, plantea la necesidad de diversificar las fuentes de proteína y desarrollar alternativas que contribuyan a satisfacer la demanda alimentaria futura (United Nations Department of Economic and Social Affairs [UN DESA], 2024). En este contexto, los análogos de carne elaborados a partir de proteínas vegetales se presentan como alternativa para diversificar el suministro de proteínas.

Estudios recientes indican que los análogos de carne tienen un impacto ambiental menor que los productos cárnicos convencionales (Zor et al., 2024). De acuerdo con reportes de la FAO, la ganadería fue el mayor contribuyente de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial en 2022, con 4.3 Gt de CO₂ eq. provenientes del metano generado durante la fermentación entérica (OECD/FAO, 2024). Además, la producción de carne requiere mayores cantidades de recursos naturales (como agua, tierra y energía) que el cultivo de cereales y leguminosas (Arrien et al., 2025). A estos factores se suman las preocupaciones relacionadas con el bienestar animal durante la crianza, el transporte y el sacrificio, las cuales también han favorecido el interés de alternativas a los productos cárnicos (Merlo et al., 2024; Onwezen et al., 2021).

Las consideraciones relacionadas con la salud también han impulsado la reducción del consumo de alimentos de origen animal. Las dietas semivegetarianas o flexitarianas, que incorporan una mayor proporción de alimentos de origen vegetal, se han asociado con un menor riesgo de enfermedades cardiovasculares, hipertensión y diabetes (Estell et al., 2021). No obstante, la exclusión total o parcial de alimentos de origen animal requiere una selección adecuada de vegetales para cubrir las necesidades de proteína y aminoácidos esenciales (Kołodziejczak et al., 2022). En este contexto, el desarrollo de análogos cárnicos con características nutricionales y tecnológicas adecuadas constituye un área de interés para la industria alimentaria.

Los análogos de carne están diseñados para imitar las características sensoriales y nutricionales de la carne tradicional, como el sabor, aroma, textura y valor proteico (Kołodziejczak et al., 2022). Para alcanzar estas características, es fundamental seleccionar adecuadamente la materia prima y

establecer las condiciones de procesamiento que permitan desarrollar una estructura semejante a la de la carne. Entre las tecnologías utilizadas con este propósito destaca la cocción por extrusión, proceso en el cual la materia prima se somete a temperatura, presión y esfuerzos de cizallamiento elevados antes de su extrusión a través de un dado (Ogunmuyiwa et al., 2017). Este proceso favorece la desnaturalización, alineación y reorganización de las proteínas, así como la formación de estructuras que contribuyen a las propiedades texturales de los productos análogos (Tziva et al., 2020).

Entre las materias primas empleadas en la elaboración de análogos cárnicos destacan la soya, el chícharo y el gluten de trigo, debido a su disponibilidad, costo y características de procesamiento (Zhang et al., 2022). Durante la extrusión, las interacciones entre proteínas, almidón, lípidos, componentes de la formulación y condiciones de procesamiento determinan la estructura y las propiedades funcionales del producto. Entre las principales variables del proceso se encuentran el contenido de humedad, la temperatura de extrusión, la velocidad del tornillo y la velocidad de alimentación. Asimismo, los parámetros propios del sistema de extrusión, como la energía mecánica específica, el tiempo de residencia, el torque y la presión en el dado, pueden modificar las características del material texturizado (Xia et al., 2023).

En los últimos años, se han desarrollado diversos estudios sobre el desarrollo de análogos cárnicos a partir de proteínas vegetales; sin embargo, existe información limitada sobre la relación entre las propiedades funcionales de texturizados proteicos comerciales y su desempeño en la elaboración de productos tipo hamburguesa. En particular, resulta de interés determinar si texturizados comerciales de diferentes fuentes proteicas presentan características funcionales, físicas y texturales comparables con las de hamburguesas de carne de res. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue caracterizar y evaluar las propiedades funcionales de tres texturizados comerciales, dos de soya (TS1 y TS2) y uno de chícharo (TC), y determinar su desempeño en la elaboración de análogos de carne de res (CR) tipo hamburguesa.

Materiales y métodos

Se emplearon tres texturizados proteicos comerciales: dos de soya (TS1 [La Colina, Tlaquepaque, Jalisco, México] y TS2 [Colpac, Montemorelos, Nuevo León, México]) y uno de chícharo (TC; Meathical, Tlalnepantla de Baz, Estado de México, México). Como productos de referencia, se utilizaron carne molida de res (CR) y un análogo vegetal comercial (AC) “Beyond Burger” (Beyond Meat®, EUA), adquiridos en establecimientos locales.

El aislado de proteína de chícharo fue proporcionado por Nano Nutrition (Nano Nutrition S. de R.L. de C.V.). La harina de garbanzo se obtuvo en el Laboratorio de Tecnología de Cereales del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (Hermosillo, Sonora, México), a partir de granos de garbanzo (*Cicer arietinum*) var. Blanco Sinaloa de calibre 4X. Los granos se molieron en un molino de martillos (modelo 200, Pulvex®, México) equipado con una malla de 1 mm. La carboximetilcelulosa sódica se obtuvo de Diquitra (Grupo Diquitra S.A. de C.V.). El polvo de betabel y el aceite de coco se adquirieron en tiendas locales de Tucson, Arizona, EUA. Las especias y el aceite de canola se obtuvieron en comercios locales de Hermosillo, Sonora, México. Todos los reactivos utilizados fueron de grado analítico y se adquirieron de Sigma-Aldrich® (St. Louis, MO, EUA).

Preparación de las muestras

Los texturizados proteicos comerciales se molieron para evaluar sus propiedades fisicoquímicas. Las muestras molidas se colocaron en bolsas de polietileno y se almacenaron a temperatura ambiente (27 °C) hasta su análisis.

Análisis químico

Se analizó el contenido de humedad, proteína, cenizas y grasa de los texturizados proteicos comerciales de acuerdo con los métodos 44.19, 46-13, 08-01 y 30-25 de la *American Association of Cereal Chemists* (AACC, 2000), respectivamente. Para determinar el contenido de proteína de los texturizados de soya y chícharo, los factores de conversión utilizados fueron 5.5 y 5.4, respectivamente (Mariotti et al., 2008). El contenido de carbohidratos totales se calculó por diferencia.

Determinación del perfil de aminoácidos

Los texturizados comerciales se hidrolizaron con HCl 6 M a 150 °C por 6 h. El perfil de aminoácidos se determinó por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC, por sus siglas en inglés), con una bomba (Thermo Scientific Accela 600, Thermo Fisher Scientific, EUA), un detector de fluorescencia (UltiMate 3000, serie FLD-3000) y una columna C18 (Agilent Microsorb 100-3, C18, 100 × 4.6 mm), de acuerdo con la metodología descrita por Vázquez-Ortiz et al. (1995).

Determinación de las propiedades funcionales de los texturizados

La capacidad de absorción de agua (CAA) se midió de acuerdo con el método 56-30 de la AACC (2000), y los resultados se expresaron en mL·g⁻¹. La capacidad de absorción de aceite (CAO) se determinó con el método descrito por Chaple et al. (2020) mediante la siguiente ecuación:

$$CAO (g \cdot g^{-1}) = \frac{\text{Aceite residual (g)}}{\text{Muestra seca (g)}} \quad (1)$$

La concentración mínima de gelificación (CMG), la actividad emulsificante (AE) y la estabilidad de la emulsión (EE) se determinaron según la metodología de Sridaran et al. (2012). Para la CMG, se prepararon 10 mL de suspensiones de las muestras en agua destilada, en concentraciones de 1 a 22 % (m/v), con incrementos de 3 %. Las suspensiones se calentaron en baño María hasta ebullición durante 1 h; después, se enfriaron por inmersión en agua y se refrigeraron a 4 °C por 2 h. La CMG se estableció cuando la muestra no se deslizó al invertir el tubo.

Para la AE, se dispersaron 300 mg de muestra en 5 mL de agua destilada y 5 mL de aceite de canola. Las mezclas se homogeneizaron en un vórtex y se centrifugaron a $1\,100 \times g$ durante 5 min. Posteriormente, se midieron la altura de la capa emulsificada y la altura total del contenido del tubo. La AE se calculó con la siguiente ecuación:

$$AE (\%) = \frac{\text{Altura de la capa emulsificada}}{\text{Altura total del contenido del tubo}} \times 100 \quad (2)$$

Para determinar la EE, las emulsiones se calentaron a 80 °C durante 30 min, se centrifugaron a $1\,100 \times g$ durante 5 min y se midió nuevamente la altura de la capa emulsificada. La EE se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$EE (\%) = \frac{\text{Altura de la capa emulsificada después del calentamiento}}{\text{Altura de la capa emulsificada antes del calentamiento}} \times 100 \quad (3)$$

Perfil de solubilidad proteica

El perfil de solubilidad proteica (PSP) se determinó de acuerdo con el método descrito por Samard y Ryu (2019), con algunas modificaciones. Se mezcló 1 g de muestra con 50 mL de agua destilada y se agitó a 37 °C durante 1 h. Posteriormente, el pH se ajustó a 2, 4, 6, 8 y 10 con HCl o NaOH 2 M. El contenido de proteína soluble en cada valor de pH se determinó por el método de Lowry (Jain et al., 2020).

Elaboración de hamburguesas

Los análogos de carne tipo hamburguesa se elaboraron de acuerdo con la formulación reportada por Webb et al. (2022), con algunas modificaciones. Las proporciones de los ingredientes se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Formulación de análogos de carne tipo hamburguesa.

Ingrediente	Contenido (%)
Texturizado hidratado	88.75
Aislado de proteína de chícharo	1.50
Harina de garbanzo	1.50
Aceite de canola	1.50
Aceite de coco	1.50
Carboximetilcelulosa	2.75
Sal	1.00
Polvo de betabel	0.75
Espicias	0.75

Para la elaboración de las hamburguesas, se utilizó una mezcla 50:50 del texturizado, conformada por una porción íntegra y otra finamente molida. La mezcla se hidrató por 1 h y, posteriormente, se colocó durante 30 min para eliminar el exceso de agua. Transcurrido este tiempo, se incorporaron los otros ingredientes (primero los secos y luego los aceites) y se mezclaron hasta obtener una distribución homogénea. Para formar las hamburguesas, se pesaron 50 g de la mezcla y se colocaron en una prensa manual para hamburguesas de 12.5 cm de diámetro y 2.5 cm de altura.

Análisis de color y perfil de textura

El análisis de color y textura se realizó en las diferentes hamburguesas (TC, TS1, TS2, CR y AC). El color se midió con un colorímetro (CR-410, Konica Minolta, Japón). Los parámetros evaluados fueron L^* (luminosidad), a^* (tonos rojos-verdes), b^* (tonos amarillos-azules), C^* (croma) y h^* (hue, ángulo de matiz).

El perfil de textura (PT) se determinó en las hamburguesas antes y después de la cocción mediante un texturómetro (TA-XT Plus, Stable Micro Systems, Reino Unido), equipado con un cilindro de 40 mm de diámetro (Hong et al., 2022). La prueba consistió en dos ciclos de compresión hasta alcanzar el 50 % de la altura inicial de la muestra, con una fuerza de 20 g y velocidades de preprueba, prueba y posprueba de 1.0, 1.0 y 5.0 mm·s⁻¹, respectivamente. Los parámetros obtenidos fueron firmeza, elasticidad, cohesividad y masticabilidad.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante estadística descriptiva y análisis de varianza de una vía. Las diferencias entre medias se determinaron mediante la prueba de Tukey-Kramer ($\alpha = 0.05$). Los análisis se realizaron con el programa NCSS (Number Cruncher Statistical System), versión 2007.

Resultados y discusión

Composición proximal de los texturizados comerciales

La composición proximal de los tres texturizados proteicos comerciales evaluados (dos de soya y uno de chícharo) se muestra en el Cuadro 2. El contenido de humedad difirió significativamente ($p < 0.05$) entre los texturizados, lo cual se pudo deber a las condiciones de procesamiento. El contenido de proteína también presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las muestras. El TC mostró el mayor contenido de proteína (60.58 %), mientras que TS1 y TS2 presentaron valores de 47.50 y 48.34 %, respectivamente. Resultados similares fueron reportados por Hong et al. (2022), quienes evaluaron diferentes texturizados proteicos vegetales y obtuvieron valores promedio de 51.40 y 72.70 %, para 14 texturizados de soya y 7 de chícharo, respectivamente. Estos autores mencionan que un contenido de proteína entre 50 y 70 % favorece el desarrollo de estructuras fibrosas durante la extrusión.

El contenido de ceniza fue significativamente menor ($p < 0.05$) en TC que en TS1 y TS2, mientras que el contenido de grasa fue significativamente mayor ($p < 0.05$) en el TC (3.48 %), similar a lo reportado por Hong et al. (2022). Las diferencias en el contenido de ceniza y grasa entre los texturizados están relacionadas con la materia, el proceso de extracción y la formulación (Tiong et al., 2026).

Cuadro 2. Comparación de medias de la composición proximal de texturizados proteicos comerciales de soya y chícharo.

Muestra	Humedad	Proteína	Ceniza	Grasa	Carbohidratos*
	(%)				
TC	3.72 ± 0.11 c	60.58 ± 0.16 a	4.82 ± 0.01 b	3.48 ± 0.20 a	27.4 ± 0.28
TS1	4.69 ± 0.39 b	47.50 ± 0.41 b	7.27 ± 0.02 a	1.26 ± 0.07 b	39.3 ± 0.57
TS2	6.51 ± 0.10 a	48.34 ± 0.30 b	7.42 ± 0.13 a	0.90 ± 0.18 b	36.8 ± 0.39

*Calculado por diferencia. Media ± desviación estándar (n = 3). TC: texturizado de chícharo; TS1: texturizado de soya 1; TS2: texturizado de soya 2. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas (Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$).

Perfil de aminoácidos de los texturizados comerciales

Se cuantificaron 15 aminoácidos en los texturizados comerciales de chícharo y soya (Cuadro 3). El ácido glutámico fue el aminoácido más abundante en las tres muestras, sin diferencias significativas entre ellas ($p > 0.05$), en concordancia con lo reportado por otros autores (Asen et al., 2023; Bulgaru et al., 2025). El ácido aspártico, la glicina, la histidina y la treonina también se encontraron en concentraciones relativamente altas entre las muestras, sin diferencias significativas entre sí ($p > 0.05$). En contraste, el TC presentó un mayor contenido de serina ($p < 0.05$) que TS1 y TS2, mientras que la arginina fue más abundante en los texturizados de soya.

Cuadro 3. Comparación de medias del perfil de aminoácidos de texturizados proteicos comerciales de chícharo (TC) y soya (TS1 y TS2).

Aminoácidos	TC	TS1	TS2
	g·100 g ⁻¹ de proteína		

Ácido aspártico	7.94 ± 0.13 a	9.30 ± 0.22 a	10.71 ± 1.14 a
Ácido glutámico	15.70 ± 0.97 a	16.71 ± 0.79 a	16.97 ± 0.86 a
Serina	5.53 ± 0.15 a	4.48 ± 0.10 b	4.57 ± 0.26 b
Histidina	10.47 ± 0.26 a	12.61 ± 1.41 a	13.88 ± 1.06 a
Glicina	12.15 ± 1.03 a	12.25 ± 0.06 a	11.14 ± 0.37 a
Treonina	10.32 ± 0.38 a	8.05 ± 0.39 a	9.50 ± 0.96 a
Arginina	1.29 ± 0.12 b	3.11 ± 0.42 a	2.80 ± 0.27 a
Alanina	3.34 ± 0.23 a	3.39 ± 0.06 a	2.98 ± 0.03 a
Tirosina	8.54 ± 0.48 a	8.83 ± 0.09 a	8.17 ± 0.82 a
Metionina	0.75 ± 0.05 b	1.07 ± 0.02 a	0.57 ± 0.03 c
Valina	3.07 ± 0.03 a	2.68 ± 0.21 a	2.72 ± 0.10 a
Fenilalanina	3.66 ± 0.09 a	2.36 ± 0.18 b	2.92 ± 0.16 b
Isoleucina	2.86 ± 0.02 a	2.57 ± 0.29 a	2.64 ± 0.24 a
Leucina	6.01 ± 0.05 a	4.15 ± 0.23 b	5.30 ± 0.32 a
Lisina	1.56 ± 0.11 a	1.90 ± 0.12 a	1.95 ± 0.09 a

Media ± desviación estándar. Letras diferentes en cada fila indican diferencias significativas (Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$).

Entre los aminoácidos esenciales, el TC presentó el mayor contenido de fenilalanina y leucina, aunque este último sin diferencia significativa con el TS2 ($p < 0.05$). La metionina fue el aminoácido menos abundante en los tres texturizados, con la mayor proporción en el TS1, seguida del TC y TS2. Este comportamiento es consistente con lo reportado en proteínas de leguminosas (Boye et al., 2010). Las diferencias observadas entre los texturizados de soya pueden estar relacionadas con las condiciones de cultivo, la variedad, el almacenamiento, el método de extracción y las condiciones de procesamiento (Asen et al., 2023).

En general, los tres texturizados presentaron una elevada proporción de aminoácidos ácidos y diferencias en la concentración de algunos aminoácidos esenciales. Estas diferencias son relevantes porque pueden influir tanto en las propiedades funcionales como en la calidad nutricional del producto final.

Propiedades funcionales de los texturizados

Los valores de CAA y CAO de los texturizados comerciales se presentan en el Cuadro 4. La CAA osciló entre 1.93 y 2.32 mL·g⁻¹, sin diferencias significativas entre TC, TS1 y TS2 ($p > 0.05$). De manera similar, la CAO varió entre 0.95 y 1.11 g·g⁻¹ y no presentó diferencias significativas entre las muestras ($p > 0.05$). Hong et al. (2022) reportaron valores promedio de CAA de 1.9 y 2.1 g·g⁻¹ para texturizados de chícharo y soya, respectivamente, mientras que los intervalos de CAO fueron de 0.82 a 1.04 y de 0.69 a 0.84 g·g⁻¹ para chícharo y soya, respectivamente.

Cuadro 4. Comparación de medias de las propiedades funcionales de texturizados proteicos comerciales de chícharo (TC) y soya (TS1 y TS2).

Muestra	CAA (mL·g ⁻¹)	CAO (g·g ⁻¹)	CMG (% g·mL ⁻¹)	AE (%)	EE (%)
TC	1.93 ± 0.17 a	0.95 ± 0.03 a	16	43.94 ± 1.44 a	9.99 ± 2.59 c
TS1	2.32 ± 0.18 a	0.97 ± 0.14 a	16	10.73 ± 0.90 c	27.00 ± 3.52 a
TS2	2.08 ± 0.16 a	1.11 ± 0.06 a	19	24.64 ± 0.61 b	15.30 ± 2.42 b

CAA: capacidad de absorción de agua; CAO: capacidad de absorción de aceite; CMG: capacidad mínima de gelificación; AE: actividad emulsificante; EE: estabilidad de emulsión. Media ± desviación estándar (n = 4). Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas (Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$).

La CAA y la CAO reflejan la capacidad de las muestras para interactuar con agua y aceite, respectivamente, a nivel macromolecular (Hong et al., 2022). En análogos cárnicos, la CAA se relaciona con la textura tras la hidratación y la CAO influye en la percepción de jugosidad, sabor y sensación en boca (Mandliya et al., 2022). Estas propiedades dependen de la composición y la estructura de las proteínas, así como de la proporción de grupos polares y no polares. Las interacciones mediante puentes de hidrógeno y otros mecanismos favorecen la asociación con agua,

mientras que la exposición de regiones hidrofóbicas puede favorecer la interacción con lípidos (Hong et al., 2022; Mandliya et al., 2022).

Los valores de CAA cercanos o superiores a $2 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ se pueden atribuir a redes proteicas formadas por desnaturalización durante la extrusión, las cuales presentan estructuras porosas capaces de retener agua (Mosibo et al., 2020). Asimismo, los carbohidratos pueden incrementar la CAA, particularmente después de la gelatinización del almidón (Hong et al., 2022; Mosibo et al., 2020). En el presente estudio, aunque el TC presentó un mayor contenido de proteína y menor contenido de carbohidratos que los TS, estos tratamientos no fueron estadísticamente diferentes en la CAA ($p > 0.05$).

En cuanto a la CAO, la interacción con regiones hidrofóbicas de las proteínas puede favorecer la retención de aceite (Brishti et al., 2017). Modificaciones estructurales asociadas con la desnaturalización pueden exponer grupos hidrofóbicos y modificar la capacidad de interacción con la fase lipídica (Hong et al., 2022). Sin embargo, la ausencia de diferencias significativas entre las muestras indica que, bajo las condiciones evaluadas, los tres texturizados presentaron una CAO comparable.

La CMG indica la cantidad mínima de proteína necesaria para formar un gel estable después del calentamiento; es decir, valores de CMG bajos se asocian con una mayor capacidad de gelificación (Xiao et al., 2025). En el presente estudio, el TS2 presentó la mayor CMG (19 %), mientras que el TC y TS1 mostraron valores de 16 % (Cuadro 4). Resultados similares a los reportados por Webb et al. (2023), quienes encontraron valores de 18 y 14 % para texturizados de mezclas de concentrado y aislado de soya, y de concentrado de soya, respectivamente, así como valores de 14–16 % para diferentes texturizados comerciales de proteína de chícharo.

La formación de geles depende del tipo de proteína, las condiciones de procesamiento (temperatura, pH y fuerza iónica) y la presencia de carbohidratos, los cuales pueden disminuir la afinidad de las proteínas por el agua y favorecer las interacciones proteína-proteína que promueven la gelificación (Guo et al., 2024; Wouters et al., 2016). En consecuencia, las discrepancias en la CMG entre TS1 y TS2 podrían estar relacionadas con diferencias en la composición o el procesamiento.

Los resultados de AE y EE se muestran en el Cuadro 4. El TS1 presentó la menor AE (10 %), seguido de TS2 (24 %) y de TC (43 %) con diferencias significativas entre las muestras ($p < 0.05$).

En cuanto a la EE, el TC presentó el valor más bajo (9.99 %), seguido de TS2 (15.30 %) y TS1 (27.00 %). Samard y Riu (2019) reportaron valores de AE similares a pH 6 para análogos de proteína de soya y chícharo (14 y 37 %, respectivamente).

La AE refleja la capacidad de las proteínas para adsorberse en la interfase, mientras que la EE indica la capacidad de las proteínas para formar una película interfacial continua y resistente a los cambios durante el almacenamiento (Samard & Ryu, 2019; Wouters et al., 2016). Por ello, una mayor AE no necesariamente implica una mayor EE. El comportamiento observado en el TC, que presentó la mayor AE pero la menor EE, ejemplifica esta diferencia entre ambos parámetros. Las variaciones entre los texturizados pueden estar relacionadas con diferencias en la composición y con modificaciones estructurales producidas durante su procesamiento, ya que estas características pueden afectar la conformación y la estabilidad de las proteínas.

Perfil de solubilidad proteica

En todos los texturizados, el PSP evidenció la disminución de la solubilidad a medida que el pH se aproximó a 4 (punto isoeléctrico), seguida de un incremento a valores de pH superiores (Figura 1). Este comportamiento coincide con lo reportado para proteínas de soya por Freitas et al. (2017) y Jaramillo et al. (2011), quienes identificaron un punto isoeléctrico entre los pH 4 y 5. De igual manera, Barac et al. (2010) y Doan y Ghosh (2019) situaron el punto isoeléctrico de las proteínas de chícharo alrededor de pH 4.3.

El comportamiento observado está relacionado con los cambios en la carga neta de las proteínas en función del pH. En condiciones más ácidas o alcalinas, la protonación o desprotonación de los grupos ionizables modifica la carga neta de las proteínas e incrementa la repulsión electrostática entre ellas. Estos cambios pueden favorecer la dispersión de las moléculas proteicas y su interacción con el agua, lo que aumenta la solubilidad (Boye et al., 2010). Samard y Riu (2019) mencionan que la baja solubilidad de las proteínas texturizadas a diferentes valores de pH se

atribuye a la desnaturalización de las proteínas ocasionada por la extrusión, lo cual disminuye las propiedades funcionales de los texturizados en comparación con los materiales en su estado nativo.

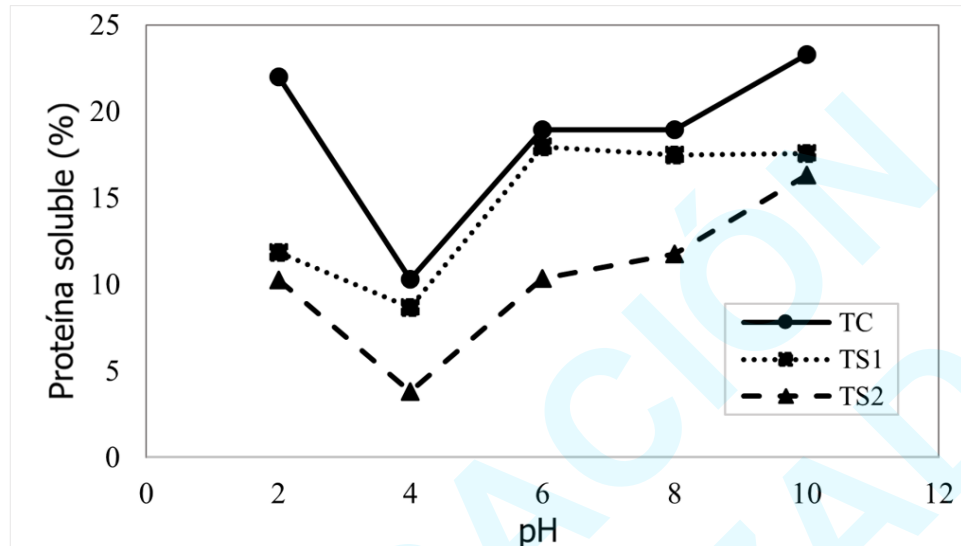


Figura 1. Perfil de solubilidad proteica de texturizados proteicos comerciales de chícharo (TC) y soya (TS1 y TS2).

Análisis de color y perfil de textura

Las hamburguesas elaboradas con los texturizados presentaron una apariencia similar entre sí (Figura 2), pero diferente a la observada con CR y AC (Figura 2). Después de la cocción, el AC mostró una estructura aparentemente más compacta que las demás formulaciones.

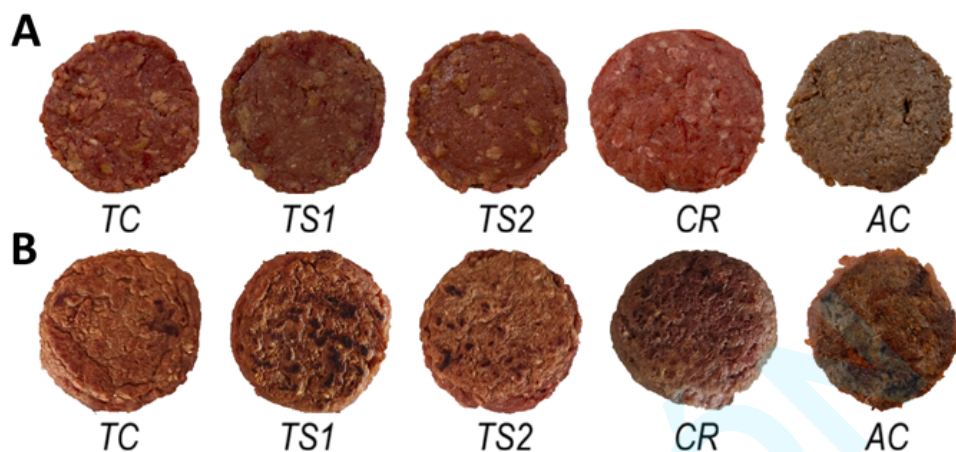


Figura 2. Hamburguesas elaboradas con texturizados proteicos comerciales y muestras de referencia en estado crudo (A) y después de la cocción (B). TC: texturizado de chícharo; TS1: texturizado de soja comercial 1; TS2: texturizado de soja comercial 2; CR: carne de res; AC: análogo vegetal comercial.

En cuanto al color de las hamburguesas, la luminosidad (L^*) disminuyó después de la cocción (Cuadro 5), lo que indica un oscurecimiento de las superficies analizadas. Sakai et al. (2022) reportaron un comportamiento similar en hamburguesas elaboradas con texturizados de chícharo y polvo de betabel, con valores de 48 a 55 y de 45 a 54 antes y después de la cocción, respectivamente. La reducción de la luminosidad puede estar relacionada con diversos cambios inducidos por el calentamiento, entre ellos las reacciones de oscurecimiento (como la reacción de Maillard) y las modificaciones estructurales (como la desnaturalización de proteínas) (Wu et al., 2024). Después de la cocción, no se observaron diferencias significativas en L^* entre TC, TS1, TS2 y CR ($p > 0.05$), lo que indica que las hamburguesas elaboradas con los texturizados alcanzaron valores de luminosidad comparables a los de CR.

Cuadro 5. Comparación de medias del análisis de color de hamburguesas elaboradas con texturizados proteicos comerciales y muestras de referencia crudas y cocidas.

Muestra	L^*		a^*		b^*		C^*		Hue	
	Cruda	Cocinada	Cruda	Cocinada	Cruda	Cocinada	Cruda	Cocinada	Cruda	Cocinada

TC	51.29 ± 1.07 aA	42.02 ± 1.36 aB	16.49 ± 0.26 aA	12.01 ± 0.61 aB	20.47 ± 0.79 aB	25.67 ± 1.29 aA	26.29 ± 0.65 aB	28.35 ± 1.19 aA	51.13 ± 1.11 cbB	64.92 ± 1.09 aA
TS1	48.97 ± 0.71 bA	39.50 ± 1.83 aB	15.77 ± 0.28 aA	12.39 ± 0.98 aB	19.76 ± 0.39 aA	22.87 ± 1.49 abA	25.28 ± 0.43 abA	26.03 ± 1.27 abA	51.41 ±0.47 cbB	61.53 ± 2.32 aA
TS2	46.68 ± 1.86 cA	39.46 ± 5.12 aB	16.79 ± 1.04 aA	11.24 ± 0.83 bB	17.67 ± 1.07 bA	20.13 ± 4.52 bA	24.40 ± 0.84 bA	23.11 ± 3.83 bcA	46.47 ± 2.94 cB	60.15 ± 4.34 aA
CR	48.14 ± 0.65 cbA	43.31 ± 2.19 aB	7.08 ± 0.52 bA	9.36 ± 1.18 cA	15.13 ± 0.29 cA	17.75 ± 1.57 bA	16.71 ± 0.23 cB	20.11 ± 1.25 cA	64.92 ± 1.86 aA	62.13 ± 3.78 aA
AC	46.21 ± 0.51 cA	29.03 ± 2.85 bB	9.82 ± 0.39 bA	8.88 ± 0.67 cA	14.50 ± 0.89 cA	9.06 ± 2.97 cB	17.52 ± 0.90 cA	12.77 ± 2.29 dB	55.85 ± 1.24 bA	44.43 ± 6.86 bB

TC: texturizado de chícharo; TS1: texturizado de soya comercial 1; TS2: texturizado de soya comercial 2; CR: carne de res; AC: análogo vegetal comercial. Media ± desviación estándar (n = 5). Letras minúsculas diferentes en cada columna y mayúsculas en cada fila (cruda vs. cocinada) indican diferencias significativas (Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$).

En a^* , las hamburguesas de TC, TS1 y TS2 presentaron valores significativamente superiores ($p < 0.05$) a los de CR y AC, antes y después de la cocción. Este resultado indica una mayor contribución de tonalidades rojizas en las formulaciones elaboradas con texturizados vegetales y polvo de betabel. No obstante, los valores de a^* disminuyeron después de la cocción, lo que evidencia una reducción de la intensidad del componente rojo. Este cambio se podría relacionar con la sensibilidad térmica de las betalaínas presentes en el betabel, cuya degradación puede ocasionar pérdida de color durante el calentamiento (Wu et al., 2024).

En el parámetro b^* , CR y AC presentaron valores significativamente menores que los texturizados vegetales antes de la cocción ($p < 0.05$). Sin embargo, después de la cocción, TS1 y TS2 presentaron valores comparables a los de CR, pero diferentes de los de AC. Estos resultados son esperados en análogos vegetales provenientes de leguminosas, ya que tienden a presentar una coloración más amarilla que la de la carne (Daszkiewicz et al., 2023).

La cromaticidad (C^*) representa la intensidad o saturación del color. En el presente estudio, este parámetro mostró respuestas diferentes según la formulación y el tratamiento térmico. Las hamburguesas de CR y TC presentaron un incremento significativo de C^* después de la cocción ($p < 0.05$). Este comportamiento podría estar relacionado con una mayor disponibilidad de grupos amino libres procedentes de las proteínas, así como de azúcares reductores que favorecen el oscurecimiento por reacciones de Maillard durante el calentamiento (Daszkiewicz et al., 2023). En las muestras crudas, las hamburguesas vegetales presentaron valores de C^* comparables a los de CR, mientras que, después de la cocción, únicamente TS2 mantuvo valores similares a los de CR.

El ángulo de tono (hue) también varió en función de la formulación y la cocción. Las hamburguesas vegetales presentaron un incremento significativo ($p < 0.05$) de este parámetro después del tratamiento térmico, mientras que CR no mostró cambios significativos. Estas variaciones indican un desplazamiento del color hacia tonalidades amarillas o marrón-rojizas, características de este tipo de productos.

Los resultados del PT de las hamburguesas cocinadas se presentan en el Cuadro 6. La firmeza de las hamburguesas elaboradas con TC, TS1 y TS2 no difirió significativamente de la de CR ($p > 0.05$); sin embargo, se observaron diferencias entre las formulaciones vegetales, y TC presentó la menor firmeza. En cuanto a la elasticidad, las hamburguesas elaboradas con los tres texturizados presentaron valores comparables a los de CR, mientras que el AC mostró una elasticidad significativamente mayor ($p < 0.05$). Estos resultados indican que las formulaciones desarrolladas con TC, TS1 y TS2 presentaron un comportamiento elástico similar al de CR bajo las condiciones de compresión empleadas.

Cuadro 6. Comparación de medias del perfil de textura de hamburguesas cocidas elaboradas con texturizados proteicos comerciales y muestras de referencia.

Muestra	Firmeza (N)	Elasticidad	Cohesividad	Masticabilidad
TC	26.00 ± 2.04 c	0.34 ± 0.04 b	0.19 ± 0.02 c	1.73 ± 0.38 b
TS1	125.44 ± 6.32 b	0.34 ± 0.02 b	0.21 ± 0.01 bc	9.21 ± 1.58 b
TS2	120.73 ± 4.55 b	0.36 ± 0.02 b	0.22 ± 0.01 bc	9.58 ± 0.49 b
CR	88.10 ± 7.33 bc	0.36 ± 0.01 b	0.24 ± 0.00 b	7.47 ± 0.98 b

AC	326.73 ± 86.76 a	0.75 ± 0.01 a	0.49 ± 0.02 a	120.22 ± 29.04 a
----	------------------	---------------	---------------	------------------

TC: texturizado de chícharo; TS1: texturizado de soya comercial 1; TS2: texturizado de soya comercial 2; CR: carne de res; AC: análogo vegetal comercial. Media ± desviación estándar (n = 6). Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas (Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$).

La cohesividad del AC fue significativamente mayor ($p < 0.05$) que la del resto de las muestras, lo que indica que la estructura interna de las hamburguesas vegetales, incluida la CR, se encuentra menos integrada y es más propensa a desmoronarse tras la compresión. Samard et al. (2021) mencionan que valores elevados de cohesividad y dureza en texturizados de proteínas vegetales están relacionados con una red proteica más fuerte.

En cuanto a la masticabilidad, el AC presentó un valor significativamente mayor ($p < 0.05$) que el resto de las hamburguesas, entre las cuales no se observaron diferencias significativas ($p > 0.05$). Bakhsh et al. (2021) reportaron valores comparables de masticabilidad en hamburguesas elaboradas con texturizados vegetales comerciales y proteína de chícharo adicionados con 1.5 % de carboximetilcelulosa. La masticabilidad representa el trabajo necesario para masticar un alimento sólido hasta alcanzar una condición adecuada para la deglución. Una masticabilidad similar a la de la CR es deseable, ya que proporciona una sensación adecuada al masticar sin resultar excesivamente firme.

Conclusiones

Los texturizados proteicos comerciales de soya y de chícharo presentaron propiedades tecnológicas y funcionales aptas para la elaboración de hamburguesas análogas a la carne de res. Las diferencias en su composición química y propiedades funcionales evidenciaron la variabilidad entre los

productos comerciales, posiblemente asociada con la materia prima y las condiciones de procesamiento.

El aprovechamiento de proteínas vegetales representa una alternativa para diversificar las fuentes proteicas en la elaboración de alimentos. No obstante, se requieren estudios complementarios que incluyan evaluaciones sensoriales para determinar la aceptación de los productos por parte de los consumidores y establecer la relación entre sus propiedades fisicoquímicas y su percepción sensorial.

Agradecimientos

Los autores agradecen al M.C. Orlando Tortoledo Ortiz por el apoyo técnico brindado para la determinación del perfil de aminoácidos. Este trabajo fue financiado por el Fondo de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (Fondo Semilla para Proyectos de Investigación 2023, 10734).

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Declaración del uso de inteligencia artificial (IA)

Los autores declaramos no haber utilizado IA generativa o tecnologías asistidas por IA para el desarrollo de la presente contribución.

Referencias

American Association of Cereal Chemists (AACC). (2000). *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists*, 10th ed. AACC International.

- Arrien, M. M., Aldaya, M. M., & Rodríguez, C. I. (2025). Livestock and water resources: A comparative study of water footprint in different farming systems. *Sustainability*, *17*, 2251. <https://doi.org/10.3390/su17052251>
- Asen, N. D., Aluko, R. E., Martynenko, A., Utioh, A., & Bhowmik, P. (2023). Yellow field pea protein (*Pisum sativum* L.): Extraction technologies, functionalities, and applications. *Foods*, *12*(21), 3978. <https://doi.org/10.3390/foods12213978>
- Bakhsh, A., Lee, S. J., Lee, E. Y., Sabikun, N., Hwang, Y. H., & Joo, S. T. (2021). A novel approach for tuning the physicochemical, textural, and sensory characteristics of plant-based meat analogs with different levels of methylcellulose concentration. *Foods*, *10*(3), 560. <https://doi.org/10.3390/foods10030560>
- Barac, M., Cabrilo, S., Pesic, M., Stanojevic, S., Zilic, S., Macej, O., & Ristic, N. (2010). Profile and functional properties of seed proteins from six pea (*Pisum sativum*) genotypes. *International Journal of Molecular Sciences*, *11*(12), 4973–4990. <https://doi.org/10.3390/ijms11124973>
- Boye, J., Zare, F., & Pletch, A. (2010). Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. *Food Research International*, *43*(2), 414–431. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.003>
- Brishti, F., Zarei, M., Muhammad, S., Ismail-Fitry, R. S., & Saari, N. (2017). Evaluation of the functional properties of mung bean protein isolate for development of textured vegetable protein. *International Food Research Journal*, *24*, 1595–605. https://www.researchgate.net/publication/346677759_Evaluation_of_the_functional_properties_of_mung_bean_protein_isolate_for_development_of_textured_vegetable_protein
- Bryant, C., & Barnett, J. (2020). Consumer acceptance of cultured meat: An updated review (2018–2020). *Applied Sciences*, *10*(15), 5201. <https://doi.org/10.3390/app10155201>
- Bulgaru, V., Mazur, M., Netreba, N., Paiu, S., Dragancea, V., Gurev, A., Sturza, R., Sensoy, I., & Ghendov-Mosanu, A. (2025). Characterization of plant-based raw materials used in meat analog manufacture. *Foods*, *14*(3), 483. <https://doi.org/10.3390/foods14030483>
- Chaple, S., Sarangapani, C., Jones, J., Carey, E., Causeret, L., Genson, A., & Bourke, P. (2020). Effect of atmospheric cold plasma on the functional properties of whole wheat (*Triticum*

- aestivum* L.) grain and wheat flour. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, 102529. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102529>
- Daszkiewicz, T., Florek, M., Wodzak, M., Kubiak, D., & Burczyk, E. (2023). Comparison of the quality of selected meat products and their plant-based analogs. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 73(2), 109–119. <https://doi.org/10.31883/pjfn/162504>
- Doan, C. D., & Ghosh S. (2019). Formation and stability of pea proteins nanoparticles using ethanol-induced desolvation. *Nanomaterials*, 9(7), 949. <https://doi.org/10.3390/nano9070949>
- Estell, M., Hughes, J., & Grafenauer, S. (2021). Plant protein and plant-based meat alternatives: Consumer and nutrition professional attitudes and perceptions. *Sustainability*, 13(3), 1478. <https://doi.org/10.3390/su13031478>
- Freitas, M. L., Albano, K. M., & Telis, V. R. (2017). Characterization of biopolymers and soy protein isolate-high-methoxyl pectin complex. *Polímeros*, 27(1), 62–67. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.2404>
- Guo, Y., Ma, C., Xu, Y., Du, L., & Yang, X. (2024). Food gels based on polysaccharide and protein: Preparation, formation mechanisms, and delivery of bioactive substances. *Gels*, 10(11), 735. <https://doi.org/10.3390/gels10110735>
- Hong, S., Shen, Y., & Li, Y. (2022). Physicochemical and functional properties of texturized vegetable proteins and cooked patty textures: comprehensive characterization and correlation analysis. *Foods*, 11(17), 2619. <https://doi.org/10.3390/foods11172619>
- Jain, A., Jain, R., & Jain, S. (2020). Protein analysis in food. In A. Jain, R. Jain, & S. Jain (Eds.), *Basic techniques in biochemistry, microbiology and molecular biology* (pp. 172–173). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9861-6_41
- Jaramillo, D. P., Roberts, R. F., & Coupland, J. N. (2011). Effect of pH on the properties of soy protein-pectin complexes. *Food Research International*, 44(1), 911–916. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.01.057>
- Klurfeld, D. M. (2018). What is the role of meat in a healthy diet?. *Animal Frontiers*, 8(3), 5–10. <https://doi.org/10.1093/af/vfy009>

- Kołodziejczak, K., Onopiuk, A., Szpicer, A., & Poltorak, A. (2022). Meat analogues in the perspective of recent scientific research: A review. *Foods*, 11(1), 105. <https://doi.org/10.3390/foods11010105>
- Mandliya, S., Pratap-Singh, A., Vishwakarma, S., Dalbhagat, C. G., & Mishra, H. N. (2022). Incorporation of mycelium (*Pleurotus eryngii*) in pea protein based low moisture meat analogue: effect on its physicochemical, rehydration and structural properties. *Foods*, 11(16), 2476. <https://doi.org/10.3390/foods11162476>
- Mariotti, F., Tomé, D., & Patureau-Mirand, P. (2008). Converting nitrogen into protein—beyond 6.25 and Jones' factors. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 48(2), 177–184. <https://doi.org/10.1080/10408390701279749>
- Merlo, M., Hennessy, T., Buckley, C., & O'Mahony, J. (2024). A comparison of animal and plant-based proteins from an economic, environmental, and nutritional perspective in the Republic of Ireland. *Agricultural Systems*, 221, 104143. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104143>
- Mosibo, O. K., Ferrentino, G., Alam, M. R., Morozova, K., & Scampicchio, M. (2020). 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>
- OECD/FAO (2024), *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2024-2033*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/2b0c9d81-es>
- Ogunmuyiwa, O. H., Adebawale, A. A., Sobukola, O. P., Onabanjo, O. O., Obadina, A. O., Adegunwa, M. O., Kajihausa, O. E., Sanni, L. O., & Keith, T. (2017). Production and quality evaluation of extruded snack from blends of bambara groundnut flour, cassava starch, and corn bran flour. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), e13183. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13183>
- Onwezen, M. C., Bouwman, E. P., Reinders, M. J., & Dagevos, H. (2021). A systematic review on consumer acceptance of alternative proteins: Pulses, algae, insects, plant-based meat alternatives, and cultured meat. *Appetite*, 159, 105058. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2020.105058>

- Sakai, K., Sato, Y., Okada, M., & Yamaguchi, S. (2022). Synergistic effects of laccase and pectin on the color changes and functional properties of meat analogs containing beet red pigment. *Scientific Reports*, 12(1), 1168. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05091-4>
- Samard, S., Maung, T. T., Gu, B. Y., Kim, M. H., & Ryu, G. H. (2021). Influences of extrusion parameters on physicochemical properties of textured vegetable proteins and its meatless burger patty. *Food Science and Biotechnology*, 30, 395–403. <https://doi.org/10.1007/s10068-021-00879-y>
- Samard, S., & Ryu, G. (2019). Physicochemical and functional characteristics of plant protein-based meat analogs. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(10), e14123. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14123>
- Sridaran, A., Karim, A. A., & Bhat, R. (2012). *Pithecellobium jiringa* legume flour for potential food applications: Studies on their physico-chemical and functional properties. *Food Chemistry*, 130(3), 528–535. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.07.062>
- Tiong, A. Y., Shrestha, S., Attenborough, E., Michalski, P., Crawford, S., Batchelor, W., & van't Hag, L. (2026). The effect of legume protein source, solubility, pH, and salt addition on the texture of meat analogues. *LWT*, 242, 118956. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.118956>
- Tziva, M., Negro, S. O., Kalfagianni, A., & Hekkert, M. P. (2020). Understanding the protein transition: The rise of plant-based meat substitutes. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 35, 217–231. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.09.004>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN DESA). (2024). *World Population Prospects 2024: Summary of Results (UN DESA/POP/2024/TR/NO. 9)*. https://desapublications.un.org/publications/world-population-prospects-2024-summary-results?_gl=1*mjdm55*_ga*Nzg0MTA3MzYwLjE3NzEyNzM1NzQ.*_ga_TK9BQL5X7Z*czE3NzEyNzgyNzYkbzIkZzAkdDE3NzEyNzgyNzYkajYwJGwwJGgw
- Vázquez-Ortiz, F. A., Caire, G., Higuera-Ciapara, I., & Hernández, G. (1995). High performance liquid chromatographic determination of free amino acids in shrimp. *Journal of Liquid Chromatography*, 18(10), 2059–2068. <https://doi.org/10.1080/10826079508013960>

- Webb, D., Dogan, H., Li, Y., & Alavi, S. (2022). Use of legume flours and fiber for tailoring structure and texture of pea protein-based extruded meat alternatives. *Journal of Food Science*, 88(1), 57–71. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16397>
- Webb, D., Dogan, H., Li, Y., & Alavi, S. (2023). Physico-chemical properties and texturization of pea, wheat and soy proteins using extrusion and their application in plant-based meat. *Foods*, 12(8), 1586. <https://doi.org/10.3390/foods12081586>
- Wouters, A. G., Rombouts, I., Fierens, E., Brijs, K., & Delcour, J. A. (2016). Relevance of the functional properties of enzymatic plant protein hydrolysates in food systems. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(4), 786–800. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12209>
- Wu, H., Sakai, K., Zhang, J., & McClements, D. J. (2024). Plant-based meat analogs: color challenges and coloring agents. *Food, Nutrition and Health*, 1(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s44403-024-00005-w>
- Xia, Y., Qian, J., Zhao, Y., Zheng, B., Wei, K., Peng, B., Yuan, J., Xing, C., & Yan, W. (2023). Effects of food components and processing parameters on plant-based meat texture formation and evaluation methods. *Journal of Texture Studies*, 54(3), 394–409. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12718>
- Xiao, R., Flory, J., Alavi, S., & Li, Y. (2025). Physicochemical and functional properties of plant proteins before and after extrusion texturization. *Food Hydrocolloids*, 163, 111119. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111119>
- Zhang, X., Zhao, Y., Zhang, T., Zhang, Y., Jiang, L., & Sui, X. (2022). High moisture extrusion of soy protein and wheat gluten blend: An underlying mechanism for the formation of fibrous structures. *LWT*, 163, 113561. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113561>
- Zor, M., Menevseoglu, A., & Ufuk, S. (2024). Plant-based meat: A sustainable alternative to meat. *GIDA*, 49(3), 504–516. <https://doi.org/10.15237/gida.GD23147>