



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
y del Medio Natural

Estudio de las condiciones de impresión 3D en el
desarrollo de alimentos proteicos.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos

AUTOR/A: Doménech Valiente, Tania

Tutor/a: Martínez Monzó, Javier

Cotutor/a: García Segovia, Purificación

Director/a Experimental: BARRIOS RODRIGUEZ, YEISON FERNANDO

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del
Medio Natural



***ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE IMPRESIÓN
3D EN EL DESARROLLO DE ALIMENTOS
PROTEICOS***

TRABAJO FIN DE GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS

Curso Académico: 2022/2023

VALÈNCIA, septiembre 2023

Autora: Tania Doménech Valiente

Tutor: Javier Martínez Monzó

Cotutora: Purificación García Segovia

Director Experimental: Yeison Fernando Barrios Rodríguez

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE IMPRESIÓN 3D EN EL DESARROLLO DE ALIMENTOS PROTEICOS

RESUMEN

La impresión 3D para la producción de alimentos funcionales es una de las tecnologías que se plantea como una solución a corto plazo. En concreto, los alimentos proteicos son esenciales para una buena alimentación. En el presente estudio se han analizado como las condiciones de impresión influyen en el desarrollo de alimentos proteicos impresos en 3D. Las variables seleccionadas fueron velocidad de impresión, diámetro de boquilla y flujo. El objetivo del estudio es ayudar a mejorar la calidad y viabilidad de alimentos impresos en 3D, por su potencial de transformar la industria alimentaria y ofrecer nuevas opciones de alimentos personalizados. Se realizaron diferentes estudios de las propiedades físicas de las muestras tras cada impresión y se observaron diferencias entre los diferentes tratamientos dependiendo de las condiciones de impresión. En general, al disminuir la velocidad de impresión, diámetro de boquilla y flujo, las propiedades de las impresiones mejoraron. Este trabajo se relaciona con cuatro ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas: Hambre cero (2); Salud y bienestar (3); Industria, innovación e infraestructura (9); Producción y consumo responsable (12).

Palabras clave: Impresión 3D alimentos, proteína, condiciones de impresión, propiedades texturales, arroz, análisis de imagen.

Autora: Tania Doménech Valiente

Tutor: Javier Martínez Monzó

Cotutora: Purificación García Segovia

Director Experimental: Yeison Fernando Barrios Rodríguez

Valencia, septiembre 2023

STUDY OF THE CONDITIONS OF 3D PRINTING IN THE DEVELOPMENT OF PROTEIN FOODS

ABSTRACT

3D printing to produce functional foods is one of the technologies that is proposed as a short-term solution. Specifically, protein foods are essential for a good diet. In the present study, we have analyzed how printing conditions influence the development of 3D printed protein foods. The selected variables were printing speed, nozzle diameter and flow. The objective of the study is to help improve the quality and viability of 3D printed foods, due to their potential to transform the food industry and offer new personalized food options. Different studies of the physical properties of the samples were carried out after each printing and differences were observed between the different treatments depending on the printing conditions. In general, by decreasing the printing speed, nozzle diameter and flow, the properties of the prints improved. This work relates to four SDGs (Sustainable Development Goals) of the United Nations 2030 Agenda: Zero Hunger (2); Health and well-being (3); Industry, innovation and infrastructure (9); Responsible production and consumption (12).

Keywords: 3D food printing, protein, printing conditions, textural properties, rice, image analysis.

Author: Tania Doménech Valiente

Tutor: Javier Martínez Monzó

Co-tutor: Purificación García Segovia

Experimental director: Yeison Fernando Barrios Rodríguez

Valencia, September 2023

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer este trabajo a Yeison, quien me ha acompañado y asesorado a lo largo de todo el proceso de investigación.

A Javier y Puri, mis tutores, por su constante trabajo para guiarme en todo el proyecto.

A mis compañeros y amigos, quienes han hecho estos cuatro años inolvidables.

Y por supuesto, a mis padres y hermana, cuyo esfuerzo y apoyo incondicional han hecho posible que llegara hasta aquí. Gracias por darme fuerzas cuando más lo necesitaba y enseñarme a no rendirme nunca.

ÍNDICE TEMÁTICO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	PROTEÍNAS VEGETALES.....	1
1.2.	IMPRESIÓN 3D.....	2
1.2.1.	<i>Tecnologías utilizadas en la impresión 3D de alimentos.....</i>	<i>2</i>
2.	OBJETIVOS.....	3
2.1.	OBJETIVO GENERAL.....	3
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
3.1.	MATERIAS PRIMAS Y PREPARACIÓN DE LA MASA	3
3.2.	DISEÑO EXPERIMENTAL	3
3.3.	PROCESO DE IMPRESIÓN.....	4
3.4.	MÉTODOS.....	5
3.4.1.	<i>Determinación de parámetros del proceso de impresión.....</i>	<i>5</i>
3.4.2.	<i>Análisis de imagen.....</i>	<i>6</i>
3.4.3.	<i>Caracterización textural</i>	<i>7</i>
4.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	7
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	8
5.1.	PARÁMETROS DEL PROCESO.....	8
5.2.	ANÁLISIS DE IMAGEN	10
5.3.	CARACTERIZACIÓN TEXTURAL.....	14
6.	CONCLUSIONES	16
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	17

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración de Impresora More 2 Pro 3D.....	4
Figura 2. Cilindro de 3cm de diámetro y 1cm de altura.....	5
Figura 3. Imágenes del análisis de imagen. (a): estructura para para la toma de imagen. (b): Imagen de plano frontal del tratamiento A1.5:B35:C1.7. (c): Imagen de plano superior del tratamiento A1.5:B35:C1.7..	6
Figura 4. Ejemplo de ensayo de TPA para el tratamiento A2:B50:C2.2. con una deformación del 40% en la primera compresión (a) y en la segunda compresión (b).....	7
Figura 5. Desviación del diámetro de cada tratamiento con respecto a un cilindro de 3cm de diámetro. Diferentes letras indican diferencias significativas entre los distintos tratamientos, con un intervalo de confianza del 95%.	11
Figura 6. Desviación del altura de cada tratamiento con respecto a un cilindro de 1cm de altura. Diferentes letras indican diferencias significativas entre los distintos tratamientos, con un intervalo de confianza del 95%.	11
Figura 7. Desviación del volumen de cada tratamiento con respecto a un cilindro de 3cm de diámetro y 1cm de altura. Diferentes letras indican diferencias significativas entre los distintos tratamientos, con un intervalo de confianza del 95%.	12

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos y condiciones de impresión.	4
Tabla 2. Valores medios de los parámetros del proceso de cada tratamiento.	8
Tabla 3. Valores medios de la densidad para la masa antes de la impresión y para los diferentes tratamientos.....	9
Tabla 4. Imágenes de plano frontal y superior de los distintos tratamientos.	13
Tabla 5. Valores medios \pm desviación típica de los parámetros texturales en cada uno de los tratamientos.....	14

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PROTEÍNAS VEGETALES

En la actualidad, nos enfrentamos a diferentes retos en la industria alimentaria. La población reclama una alimentación más personalizada que pueda satisfacer las diferentes necesidades dietéticas. Todo esto con el fin de aumentar la calidad de vida de las personas.

La proteína es un macronutriente, compuesto de aminoácidos, esencial en la dieta pues interviene en el crecimiento del cuerpo humano y de gran parte de las funciones fisiológicas (Adenekan et al., 2017). La demanda de este nutriente ha ido al alza en las últimas décadas, en parte por las recomendaciones médicas como la disminución del consumo de carbohidratos o la necesidad de aumentar el contenido de proteínas en deportistas y personas en edad de crecimiento como son los niños.

Del mismo modo, también ha aumentado la búsqueda de alternativas a las proteínas animales. Debido, al impacto del consumo de carne en la salud humana, el cambio climático y el bienestar animal (De Gavelle et al., 2019; Hertzler et al., 2020). Como resultado, se ha producido una tendencia hacia una transición de proteínas animales a proteínas de origen vegetal en todo el mundo, especialmente en los países occidentales (Qin et al., 2022). Además, presentan diferentes beneficios para la salud en comparación con los productos de origen animal, correlacionándose con un menor riesgo de enfermedades cardiovasculares, diabetes tipo 2 o cáncer colorrectal (Päivärinta et al., 2020).

Las proteínas vegetales se encuentran principalmente en cereales, legumbres y frutos secos. Concretamente, el arroz es el cultivo más extendido del mundo y su proteína contiene 17 aminoácidos, de los cuales 9 son esenciales y 8 no esenciales, que además cuentan con un alto valor nutricional y poder biológico (López et al., 2022). Adicionalmente, se ha descubierto que uno de los péptidos del arroz tiene actividad antioxidante e inmunomoduladora (Cai et al., 2023).

1.2. IMPRESIÓN 3D

La fabricación aditiva (AM) o la impresión 3D es una tecnología que permite producir objetos en 3 dimensiones mediante la disposición de capas en varios cortes transversales. En la última década su uso ha tenido gran relevancia en diferentes áreas de trabajo como son la medicina, ingeniería, educación y también en la industria de alimentos (Schubert et al., 2013).

En particular, su uso en la producción de alimentos podría tener especial importancia en la producción de alimentos personalizados, influyendo en la composición nutricional, forma y dimensiones, estructura interna y sabor. Esto permitiría adaptarse a las necesidades particulares como podría ser una insuficiencia de vitaminas y minerales en la dieta (Derossi et al., 2018).

1.2.1. Tecnologías utilizadas en la impresión 3D de alimentos

En el campo de la fabricación de alimentos se conocen 4 técnicas de impresión 3D. En primer lugar impresión por extrusión, que consiste en la deposición de un flujo continuo de material capa tras capa (Guo et al., 2019). Los materiales utilizados en esta técnica suelen tener propiedades altamente coloidales que permiten formar geles y suspensiones estables. Su uso en alimentos suele estar destinado a la impresión de masas, pures o chocolates. (Liu et al., 2017). La impresión 3D por extrusión se puede clasificar en función de la unidad que se utiliza para extruir la tinta, esta unidad puede ser un tornillo, una jeringa o presión de aire (Sun et al., 2018).

Otra técnica utilizada en impresión 3D de alimentos es la impresión por inyección de tinta. Esta se basa en una corriente de gotas guiada por un sistema asistido desde una computadora a regiones donde se utilizan para decorar o rellenar. Los materiales utilizados suelen tener una viscosidad baja que no poseen una elevada resistencia mecánica (Ling et al., 2022).

La sinterización selectiva por láser (SLS) es otra de las tecnologías de impresión 3D aunque su uso en alimentos no es muy común. Consiste en un láser que fusiona las partículas de polvo. Actúa capa por capa lo que la fusión selectiva y progresiva produce una estructura 3D. Esta tecnología tiene un gran uso en el sector cerámico y metalúrgico, pero alguno de los inconvenientes para su utilización en alimentos son la necesidad de que el alimento sea un material en polvo y la gama de alimentos con estas características es reducida, y la implicación de la descomposición del material al fusionarse (Diaz, 2013).

Por último, la impresión basada en la inyección de aglomerante deposita materiales en polvo en capas y después se añade aglutinante en regiones selectivas. Finalmente, el polvo que no ha sido retenido por el aglutinante es eliminado (Liu et al., 2017).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la influencia de las condiciones de impresión en el desarrollo de alimentos proteicos impresos en 3D.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el efecto de diferentes parámetros de impresión en la printabilidad de la proteína de arroz.
- Investigar la influencia de las condiciones de impresión en las características texturales de la proteína de arroz impresa.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIAS PRIMAS Y PREPARACIÓN DE LA MASA

Se preparó una mezcla con un 30% de proteína de arroz (Rice I850XF de Roquette Freres, Francia), un 70% de agua y un 0,5% de goma xantana (Sosa Ingredients S.L, Barcelona, España). En primer lugar, se pesaron los ingredientes en una balanza (Ohaus, model PA2202C, Suecia). Después, se calentó el agua a 30°C mediante calentamiento magnético (VWR VMS-C7, Alemania), y se disolvió la goma xantana agitando. A continuación, esta solución se combinó con proteína de arroz, y la temperatura de la mezcla se ajustó a 25 °C antes de la impresión.

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la realización de este estudio se ha seguido un diseño completamente aleatorizado diseñado con el programa Statgraphics Centurion 19, versión 19.1.2 (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, Virginia, EE. UU.). El diseño consta de 5 tratamientos diferentes indicados en la Tabla 1. Los parámetros del proceso son altura de capa, velocidad de impresión, y diámetro de boquilla. Para cada tratamiento se realizaron 3 repeticiones, por lo que se obtuvo un total de 15 unidades experimentales. Los rangos de valores de cada una de las variables se asignaron a partir de datos bibliográficos de otros estudios con características parecidas (Keerthana et al., 2020; Niu et al., 2023; Demircan et al., 2023).

Tabla 1. Tratamientos y condiciones de impresión.

Tratamiento	Altura de capa (mm)	Velocidad de impresión (mm/s)	Diámetro de boquilla (mm)
A1:B20:C2.2	1	20	2.2
A2:B50:C2.2	2	50	2.2
A2:B20:C1.2	2	20	1.2
A1:B50:C1.2	1	50	1.2
A1.5:B35:C1.7	1.5	35	1.7

3.3. PROCESO DE IMPRESIÓN

Para realizar la impresión se utilizó una impresora 3D comercial (More 2 Pro 3D, Shenzhen Technology Co, China) similar a la Figura 1. Consta de un sistema de extrusión controlado por motores y un sistema de posicionamiento X-Y-Z. El equipo unido a un émbolo con un pistón unido a un tornillo sin fin producía el flujo de la masa sobre una placa de plástico. Todos los tratamientos se realizaron a temperatura ambiente (Temperatura = 25.16 ± 0.31 °C y HR = $52.72 \pm 1.9\%$).

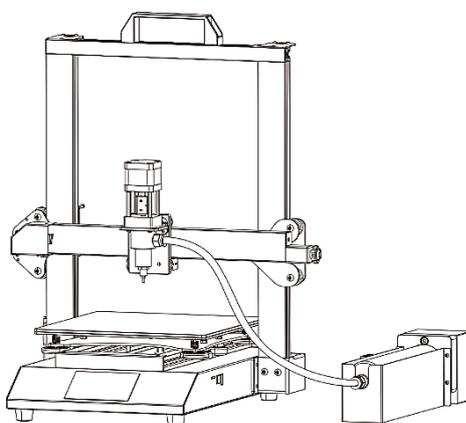


Figura 1. Ilustración de Impresora More 2 Pro 3D.

Para la impresión de la tinta proteica se realizó un diseño de un cilindro con dimensiones de 3cm de diámetro y 1 cm de altura (Figura 2) mediante el software gratuito, Thinkercad (Thinkercad, Autodesk, Inc., San Rafael, California, EE. UU.). A continuación, para que la impresora pudiera leer las instrucciones se trasladó el archivo al programa CURA (UltiMaker-Cura-5.3.1, software gratuito) que traduce la información a "G-code". Además, se ajustaron los valores para los parámetros de altura de capa y velocidad de impresión para que cumplieran con las condiciones de cada uno de los tratamientos especificados en la Tabla 1.

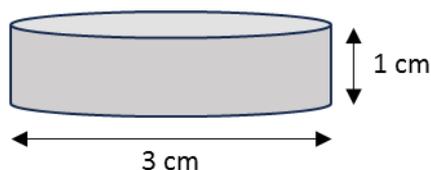


Figura 2. Cilindro de 3cm de diámetro y 1cm de altura.

3.4. MÉTODOS

Los métodos utilizados para cada estudio se realizaron en las 15 impresiones de las que consta el diseño, es decir, se realizó cada estudio por triplicado en cada uno de los 5 tratamientos.

3.4.1. Determinación de parámetros del proceso de impresión

Para obtener información sobre las diferencias entre los tratamientos se eligieron 4 variables del proceso que nos dieran información de cómo afecta el proceso de impresión a la masa: tiempo de impresión (s), densidad aparente (kg/L), peso (g), flujo másico (mg/s).

- El tiempo de impresión (t) se define como el tiempo transcurrido desde el inicio de la impresión hasta su finalización y se midió mediante un cronómetro manual en cada uno de los tratamientos definidos anteriormente.
- El peso (m_i) es un parámetro que nos indica la cantidad de masa que se ha impreso. La masa de la proteína se determinó en una balanza (Ohaus, model PA2202C, Suiza). Para esto se determinó el peso de la placa de plástico sobre la que se realizaba cada impresión y que facilitaba el transporte de las muestras impresas. Después, tras cada impresión se media el peso de la placa con cada muestra. Finalmente el peso de cada muestra se calculaba por la diferencia entre la masa de la placa con la muestra y la masa de la placa. El flujo másico relaciona el tiempo de impresión con el peso de las muestras, nos informa de la cantidad de masa que fluía en el promedio del tiempo. Se calculó dividiendo la masa de cada muestra (m_i) entre el tiempo de impresión (t_i), como se indica en la Ecuación 1.

$$Q_i = \frac{m_i}{t_i} \quad (1)$$

- La densidad aparente (ρ_{ap}) se define como la relación existente entre la masa del producto y el volumen que ocupa, incluyendo el aire ocluido en su interior. Para el cálculo de la densidad aparente en primer lugar se pesó la probeta (m_p) sin masa y luego con masa (m_{p+m}), que alcanzaba un volumen de 4ml (V). La densidad aparente se calculó según la Ecuación 2.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{p+m} - m_p}{V} \quad (2)$$

3.4.2. Análisis de imagen

Mediante el análisis de imagen se determinó las características de forma altura, diámetro y volumen de los cilindros proteína impresos. Las imágenes fueron captadas tras cada impresión desde el plano superior y frontal desde una cámara sujeta a una estructura fija (Figura 3a).

Para el análisis se utilizó el programa Image J (ImageJ, NIH, EE. UU.). El sistema se calibro con una regla ubicada al lado de la muestra. Para cada imagen se realizaron 5 mediciones en la que se calculó el promedio de los valores para cada tratamiento. Las mediciones de las dimensiones se tomaron para las imágenes frontales, de la altura de la muestra (Figura 3b) y para las imágenes del plano superior de diámetro (Figura 3c).

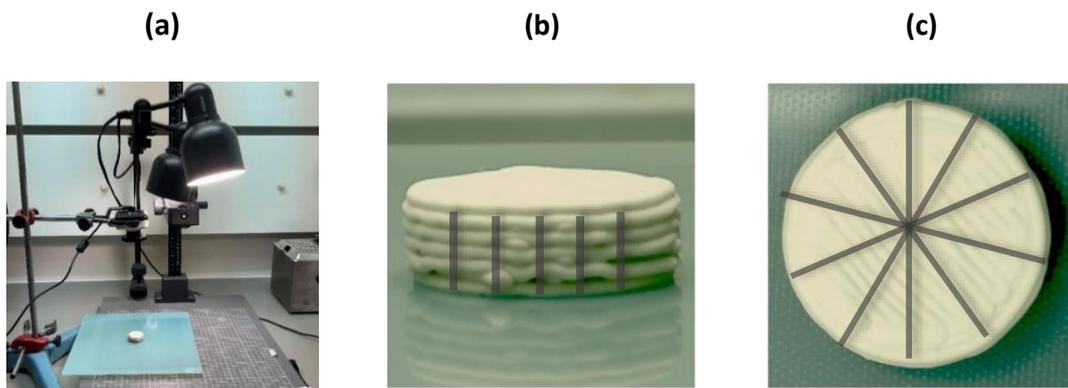


Figura 3. Imágenes del análisis de imagen. (a): estructura para para la toma de imagen. (b): Imagen de plano frontal del tratamiento A1.5:B35:C1.7. (c): Imagen de plano superior del tratamiento A1.5:B35:C1.7..

Para el cálculo del % de variación (%V) de las dimensiones calculadas con el análisis de imagen (C) con respecto a las programadas (R) de altura, diámetro y volumen se implementó la Ecuación 3:

$$\%V = \frac{C - R}{R} \times 100 \quad (3)$$

3.4.3. Caracterización textural

Se realizó un Análisis de Perfiles de Textura (TPA) para cada uno de los cilindros de proteína después de su impresión en 3D utilizando un texturómetro TA.XT.plus (Stable Micro Systems, Godalming, Surrey, Reino Unido). Se empleó una sonda cilíndrica de aluminio con un diámetro de 4 cm y una carga de 50 kg. Durante el análisis de textura, se aplicó una doble compresión a una velocidad constante de 0,5 mm/s, con un intervalo de reposo de 5 segundos entre cada ciclo (Figura 4). La deformación aplicada representó el 40% de la longitud original del material. Los parámetros de interés, tales como la dureza, adhesividad, cohesividad, elasticidad, gomosidad y resiliencia, fueron extraídos mediante el software Texture Exponent 32 (Stable Micro Systems, Godalming, Reino Unido).

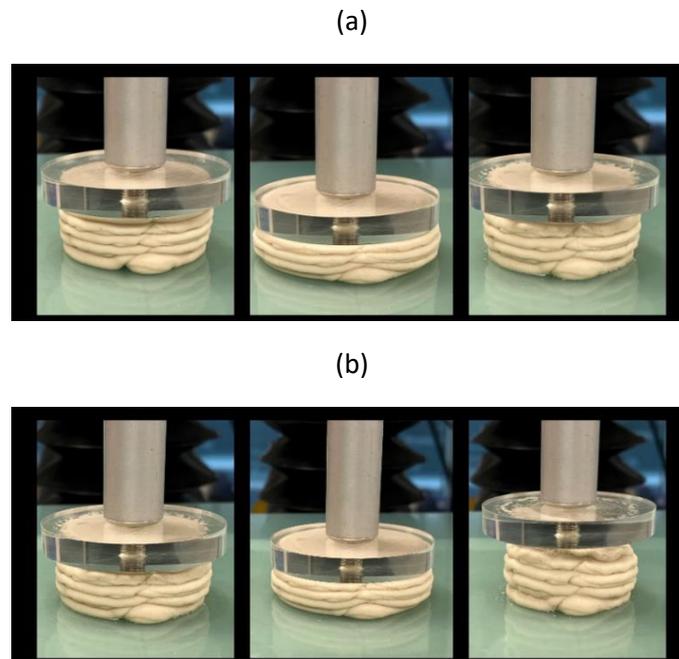


Figura 4. Ejemplo de ensayo de TPA para el tratamiento A2:B50:C2.2. con una deformación del 40% en la primera compresión (a) y en la segunda compresión (b).

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico de los datos se realizó un ANOVA con un nivel de confianza de 95% mediante el programa Statgraphics Centurion 19, versión 19.1.2 (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, Virginia, EE. UU.). El objetivo de este era evidenciar los efectos simples de cada variable estudiada. También, se realizó una prueba post-hoc para las variables que mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las medias para identificar cuáles son los grupos diferentes. La prueba que se realizó fue la prueba LSD (Least significant difference) de Fisher que es un test de comparaciones múltiples entre las medias de los diferentes tratamientos.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. PARÁMETROS DEL PROCESO

Los resultados de los parámetros de los procesos de impresión se muestran en la Tabla 2. El análisis estadístico de los datos ha evidenciado diferencias estadísticamente significativas (p -valor $< 0,05$) para peso, tiempo de impresión y flujo másico.

Tabla 2. Valores medios de los parámetros del proceso de cada tratamiento.

Tratamiento	Peso (g)	Tiempo de impresión (s)	Flujo másico (mg/s)
A1:B20:C2.2	9,8 ± 0,7(a)	333,7 ± 4,5(a)	29,4 ± 1,7(a)
A2:B50:C2.2	11,2 ± 0,4(b)	92,3 ± 2,5(b)	120,9 ± 4,9(b)
A2:B20:C1.2	7,4 ± 0,5(c)	122,3 ± 4,0(c)	60,2 ± 4,9(c)
A1:B50:C1.2	5,7 ± 0,4(d)	157,3 ± 2,1(d)	36,0 ± 2,0(a)
A1.5:B35:C1.7	7,0 ± 0,3(c)	98,7 ± 1,2(e)	71,4 ± 3,7(d)

Diferentes letras en la misma columna indican diferencias significativas entre los distintos tratamientos, con un intervalo de confianza del 95%.

En cuanto al peso, los valores más altos corresponden con los tratamientos A1:B20:C2.2 y A2:B50:C2.2, ambos constan del diámetro de boquilla más elevado (2.2mm). Una boquilla cuyo diámetro es alto puede ocasionar un diámetro de líneas de extrusión superior al deseado, provocando una deposición de volumen de material más alto. (Liu et al., 2017). Además, cuando se mantiene el diámetro de boquilla estable, A1:B20:C2.2 y A2:B50:C2.2, y peso más elevado son aquellos cuya altura de capa es superior. Entre los tratamientos A1:B20:C2.2 y A2:B50:C2.2, con un diámetro de boquilla de 2,2mm, el segundo con una altura de capa de 2mm es el que tiene un 14% más de peso que el primero que tiene una altura de capa de 1mm. Lo mismo ocurre entre los tratamientos con un diámetro de boquilla de 1,2mm, A2:B20:C1.2 y A1:B50:C1.2 con una diferencia de 30%. Los tratamientos con alturas de capa más altas, el volumen de material extrusionado es más elevado y esto provoca que el flujo másico también sea superior. Por lo que A2:B50:C2.2, A1.5:B35:C1.7 y A2:B20:C1.2 son los tratamientos con mayor flujo másico. Según alguno de los estudios en los que se ha estudiado este parámetro, el flujo másico aumenta al aumentar la velocidad de extrusión y el diámetro de la línea de extrusión. (Anukiruthika et al., 2020).

El tratamiento con el flujo másico más elevado fue A2:B50:C2.2 ($120,9 \pm 4,9$ mg/s), así mismo también fue el tratamiento con la velocidad de impresión más elevada 50mm/s y el diámetro de boquilla más alto 2,2mm, por lo que los resultados se ajustarían a los datos bibliográficos.

En cuanto al tiempo de impresión, en este caso depende de la altura de capa y la velocidad de impresión. La altura de capa condiciona el tiempo necesario para la impresión puesto que cuanto más baja es, mayor es el número de capas necesarias para llegar a la altura de la figura diseñada. Por otro lado, la velocidad de impresión repercute al tiempo total en que se imprime el cilindro, puesto que cuanto mayor sea la velocidad a la que se imprime menor será el tiempo impresión. Esto se corrobora con los resultados obtenidos, evidenciando que los tratamientos que tardaron más tiempo en imprimirse fueron A1:B20:C2.2 con la altura de capa y velocidad de impresión más baja, y A2:B20:C1.2 con una velocidad de impresión de 20mm/s.

En el estudio de la densidad aparente, se realizaron mediciones de la masa antes de la impresión (MC) y después de cada una de las impresiones. En el estudio estadístico de los datos de cada tratamiento se evidenciaron diferencias significativas entre las medias de la masa y los 5 tratamientos (Tabla 3).

Tabla 3. Valores medios de la densidad para la masa antes de la impresión y para los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Densidad aparente (Kg/L)
MC	$0,855 \pm 0,029a$
A1:B20:C2.2	$0,880 \pm 0,041ab$
A2:B50:C2.2	$0,869 \pm 0,040ab$
A2:B20:C1.2	$0,898 \pm 0,025abc$
A1:B50:C1.2	$0,895 \pm 0,009ab$
A1.5:B35:C1.7	$0,930 \pm 0,039c$

Diferentes letras en la misma columna indican diferencias significativas entre los distintos tratamientos, con un intervalo de confianza del 95%. MC = Masa antes de la impresión.

Si comparamos los datos de MC se observa como este es el valor más bajo. Esto podría deberse a que en la impresión parte del aire ocluido en la masa se pierde en la extrusión. Por ello, la porosidad del material disminuiría al ser impreso. En este caso, el tratamiento que más reduce su porosidad es A1.5:B35:C1.7. En cuanto a términos de eficiencia, es interesante que la porosidad de reduzca puesto que el aire ocluido puede causar problemas en la impresión, formando burbujas de aire que obstruyan los conductos.

5.2. ANÁLISIS DE IMAGEN

El análisis de imagen de las diferentes impresiones nos da información de la adaptabilidad de la masa a las diferentes condiciones de impresión. Los datos de las mediciones se estudiaron en función de la variabilidad de cada muestra con los valores de la figura diseñada, un cilindro con 3 cm de diámetro y 1 cm de altura.

En la Figura 5 observamos los resultados de la variación de diámetro de cada tratamiento. Los valores de variación positivos indican que el cilindro impreso constaba de un diámetro superior a 3cm como es el caso de los tratamientos A2:B50:C2.2 (3,19 cm) y A1.5:B35:C1.7 (3,03 cm), en el resto de los tratamientos que muestran variaciones negativas, corresponden con diámetros inferiores a las medidas predeterminadas. El análisis estadístico ha evidenciado una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) entre las medias de los tratamientos.

Tras realizar la prueba post hoc se han identificado 3 grupos diferentes (Figura 5). El tratamiento con una mayor variación ha sido el tratamiento A2:B50:C2.2, que consta del diámetro de boquilla y velocidad de impresión. Este tratamiento, coincide con el que ha obtenido valores de peso y flujo másico más elevados. Según estudios previos, diámetros de boquilla más altos proporcionan filamentos de impresión más gruesos de lo previsto y con menor resolución, esto provoca que el exceso de material se deposite en líneas de impresión no indicadas aumentando el diámetro de la figura. Mientras que las boquillas con diámetros más bajos proporcionaban un filamento más exacto y con mejor resolución. Cabe destacar, que diámetros demasiado bajos podrían causar una extrusión de líneas inconsistentes, por lo que se debería optimizar para cada material. En el caso de los tratamientos con diámetros de boquilla más bajos obtenemos unos diámetros inferiores a los teóricos. (Liu et al., 2017). Por otro lado, los tratamientos con mayor velocidad de impresión A2:B50:C2.2 y A1:B50:C1.2 han resultado ser lo que muestran más variaciones, por lo que se puede considerar que a velocidades de impresión más bajas se muestra una mayor exactitud en las dimensiones.

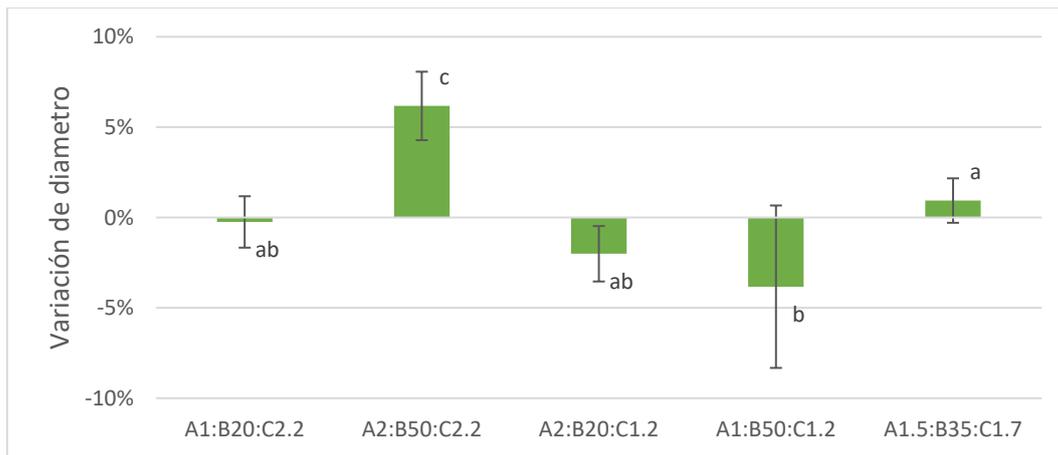


Figura 5. Desviación del diámetro de cada tratamiento con respecto a un cilindro de 3cm de diámetro. Diferentes letras indican diferencias significativas entre los distintos tratamientos, con un intervalo de confianza del 95%.

En la Figura 6 se muestran las variaciones de altura de los diferentes tratamientos, siendo los valores positivos alturas superiores a la de la figura diseñada. En este caso, las pruebas estadísticas han evidenciado diferencias significativas entre los tratamientos. En los que se diferencias 2 grupos diferentes, por un lado el tratamiento A1.5: B35:C1.7 (0,9 cm) y por otro lado el resto de los tratamientos. Esto evidencia que las condiciones de velocidad, diámetro y altura de capa en valores intermedio del rango trabajado en el proceso de impresión pueden generar valores inferiores de altura a la programada para la impresión.

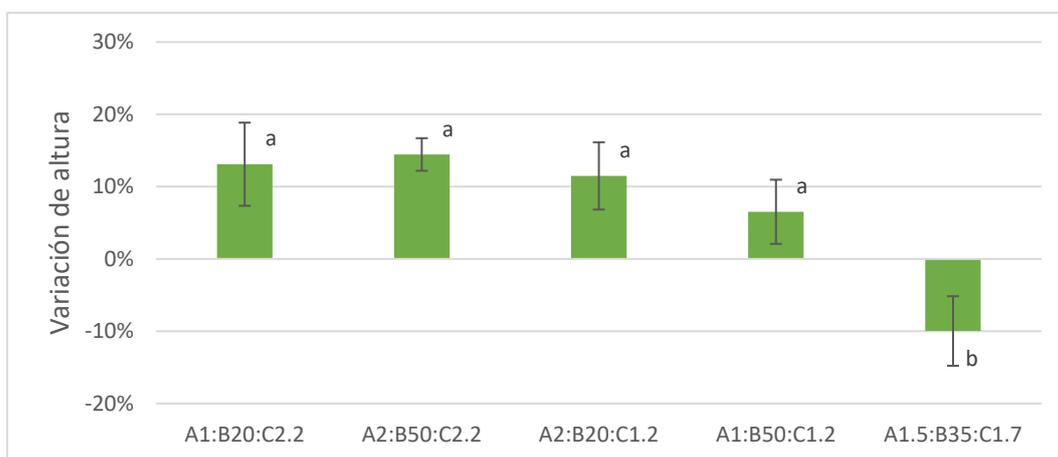


Figura 6. Desviación del altura de cada tratamiento con respecto a un cilindro de 1cm de altura. Diferentes letras indican diferencias significativas entre los distintos tratamientos, con un intervalo de confianza del 95%.

Para el caso del volumen, los tratamientos evidenciaron diferencias significativas ($p < 0,05$). El tratamiento con mayor variación en positivo (29%) es el tratamiento A2:B50:C2.2 (Figura 7), que a su vez corresponde con los valores más altos de diámetro y altura. Esto se debe a que en este tratamiento se ha depositado más cantidad de material que el teórico, ya que es el tratamiento

con el peso más elevado, por lo que indica un posible aumento de las dimensiones del cilindro. El volumen de las muestras está condicionado por el diámetro y la altura de estos, por lo que si ambos aumentan, también lo hace el volumen. En el caso del tratamiento A1.5:B35:C1.7, el diámetro de este es 0,94% superior, pero la altura es considerablemente inferior (-9,97%) por lo que conlleva a obtener un menor volumen. En contraparte, los tratamientos A1:B20:C2.2 y A2:B20:C1.2 en los que obtuvieron diámetros (2,99 cm y 2,93 cm) inferiores, pero altura (1,13 cm y 1,12 cm) y volúmenes superiores a los teóricos. En el caso del tratamiento A1:B50:C1.2, el volumen es 1,45% inferior al diseñado, a pesar de tener una variación positiva en la altura la variación negativa de diámetro disminuye considerablemente su volumen.

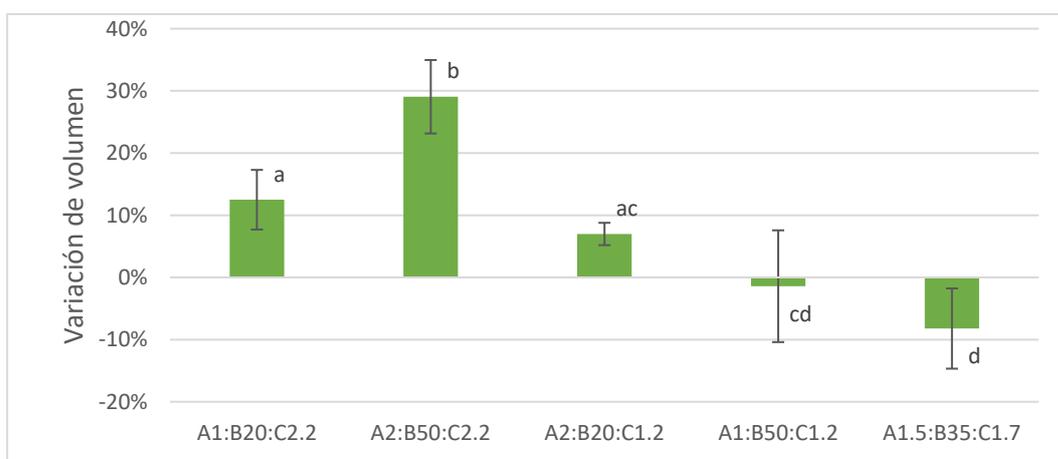


Figura 7. Desviación del volumen de cada tratamiento con respecto a un cilindro de 3cm de diámetro y 1cm de altura. Diferentes letras indican diferencias significativas entre los distintos tratamientos, con un intervalo de confianza del 95%.

Las imágenes de los cilindros de proteína impresos (Tabla 4) evidencian las diferencias entre los diferentes tratamientos. En el caso de la muestra A1:B20:C2.2 se vio como la masa fue arrastrada por la boquilla durante la impresión provocando un colapso del material, lo que provocó una calidad superficial deficiente. En el caso de los tratamientos con el diámetro de boquilla más bajos A2:B20:C1.2 y A1:B50:C1.2, se observan muestras con mejor resolución y mayor suavidad. Esto se debe a que los diámetros de boquilla más bajos evitan una extrusión del material en exceso (Anukiruthika et al., 2020). En el caso del tratamiento A1:B50:C1.2 se obtuvo la mejor resolución entre todos los tratamientos, con una superficie fina y líneas de extrusión uniformes y sin cortes. Esto se puede deber a que los tratamientos con alturas de capa más bajas deben dar una mejor precisión en la impresión ya que aumenta la densidad y la estructura es más firme (Heckl et al., 2023).

Tabla 4. Imágenes de plano frontal y superior de los distintos tratamientos.

Ensayo	Frontal	Superior
A1:B20:C2.2		
A2:B50:C2.2		
A2:B20:C1.2		
A1:B50:C1.2		
A1.5:B35:C1.7		

5.3. CARACTERIZACIÓN TEXTURAL

El estudio de perfil de textura nos da información de cuál es el comportamiento de las masas cuando son sometidas a una fuerza mecánica (Anukiruthika et al., 2020). En la Tabla 5 se presentan los datos de los parámetros de textura obtenidos en ensayo TPA. En el análisis estadístico de los resultados del ensayo TPA, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (p -valor $< 0,05$) para los parámetros elasticidad, adhesividad y resiliencia.

Tabla 5. Valores medios \pm desviación típica de los parámetros texturales en cada uno de los tratamientos.

Tratamiento	Dureza (N)	Cohesividad	Elasticidad
A1:B20:C2.2	2,78 \pm 0,42a	0,563 \pm 0,055abc	0,840 \pm 0,055a
A2:B50:C2.2	1,85 \pm 0,25b	0,583 \pm 0,037bc	0,812 \pm 0,031a
A2:B20:C1.2	3,28 \pm 0,49ac	0,496 \pm 0,093ab	0,685 \pm 0,186a
A1:B50:C1.2	3,46 \pm 0,34c	0,448 \pm 0,084 ^a	0,754 \pm 0,211a
A1.5:B35:C1.7	2,77 \pm 0,15a	0,635 \pm 0,026c	0,761 \pm 0,226a
Tratamiento	Adhesividad (N*s)	Gomosidad (N)	Resiliencia
A1:B20:C2.2	-8,70 \pm 1,49a	1,558 \pm 0,199a	0,0448 \pm 0,0063a
A2:B50:C2.2	-6,94 \pm 4,76a	1,250 \pm 0,399b	0,0541 \pm 0,0140a
A2:B20:C1.2	-9,89 \pm 5,35a	1,621 \pm 0,399a	0,0528 \pm 0,0183a
A1:B50:C1.2	-6,41 \pm 3,20a	1,545 \pm 0,311a	0,0523 \pm 0,0045a
A1.5:B35:C1.7	-9,60 \pm 4,71a	1,783 \pm 0,049a	0,0510 \pm 0,0120a

Diferentes letras en la misma columna indican diferencias significativas entre los distintos tratamientos, con un intervalo de confianza del 95%.

La dureza evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos A2:B50:C2.2 y A1:B50:C1.2 principalmente, los cuales comparten la condición de velocidad de impresión de 50mm/s. Los valores más elevados se presentan en los tratamientos A1:B50:C1.2 y A2:B20:C1.2, ambos con el menor diámetro de boquilla. Esto indica que estos tratamientos requieren una fuerza mayor para que el alimento sufra un cierto grado de deformación. Por otro lado, estos tratamientos son los que en el análisis de imagen presentan una mejor printabilidad, evidenciando una mejor compactibilidad de las capas de impresión (Tabla 4). Por su parte, la cohesividad es un parámetro relacionado con la adhesión dentro del material, una cohesividad baja indica una estructura con interacciones débiles entre partículas (Jiang et al., 2018). En este

estudio los valores más bajos son A1:B50:C1.2 y A2:B20:C1.2, los dos tratamientos que obtuvieron una mayor dureza. Esto podría deberse a que una mayor valor en la dureza implica una mayor dificultad para recuperar su forma original. La elasticidad significa la capacidad de la muestra para recuperar la su forma original tras una deformación. La gomosidad, es un parámetro importante para la masticabilidad del alimento y es el producto de la cohesividad por la dureza. Nos informa del número de masticaciones necesarias para la deglución del alimento. Las diferencias significativas para este parámetro se encuentran en el tratamiento A2:B50:C2.2., puesto que están significativamente por debajo del resto. Este tratamiento también ha sido el que ha evidenciado más diferencias significativas, respecto al resto de tratamientos, en el parámetro de dureza.

6. CONCLUSIONES

Se han evidenciado efectos significativos de las condiciones de impresión de altura de capa, velocidad de impresión y diámetro de boquilla en los parámetros del proceso como peso o flujo másico. Se ha evidenciado que un mayor diámetro de boquilla causa una mayor deposición de producto, provocando que el peso y flujo másico aumente. La densidad aparente se vio afectada por la impresión, donde las condiciones de impresión intermedias dieron los mejores resultados.

En el análisis de imagen se determinó que los tratamientos con diámetro de boquilla y velocidad de impresión menores fueron los que obtuvieron una mejor printabilidad y se ajustaron mejor a las dimensiones del diseño. Por el contrario, boquillas más anchas y velocidades más elevadas provocaban filamentos de extrusión demasiado gruesos y sin resolución.

Alguna de las propiedades texturales se vio afectadas como la dureza, la cual aumento en los tratamientos con diámetros de boquilla más bajos, pero la cohesividad disminuyo. La gomosidad disminuyo al aumentar la velocidad de impresión, altura de capa y diámetro de boquilla.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADENEKAN, M. K., BABIKER, E. E., ODUNMBAKU, L. A., & OKE, E. K. (2017). Effect of isolation techniques on the characteristics of pigeon Pea (*Cajanus cajan*) protein isolates. *Food Science and Nutrition*, 6(1), 146-152.
- ANUKIRUTHIKA, T., MOSES, J., & ANANDHARAMAKRISHNAN, C. (2020). 3D printing of egg yolk and white with rice flour blends. *Journal of Food Engineering*, 265, 109691.
- CAI, Y., LI, Q., LI, D., SUN, C., BAO, Y., LI, F., & JIANG, S. (2023). Optimizing the extraction of protein from broken rice using response surface methodology and comparing the protein functional properties. *Journal of Cereal Science*, 113, 103726.
- DE GAVELLE, E., DAVIDENKO, O., FOUILLET, H., DELARUE, J., DARCEL, N., HUNEAU, J., & MARIOTTI, F. (2019). Self-declared attitudes and beliefs regarding protein sources are a good prediction of the degree of transition to a low-meat diet in France. *Appetite*, 142, 104345.
- DEMIRCAN, E., AYDAR, E. F., MERTDİNÇ, Z., KASAPÖĞLU, K. N., & ÖZÇELİK, B. (2023). 3D printable vegan plant-based meat analogue: fortification with three different mushrooms, investigation of printability, and characterization. *Food Research International*, 173, 113259.
- DEROSSI, A., CAPORIZZI, R., AZZOLLINI, D., & SEVERINI, C. (2018). Application of 3D printing for customized food. A case on the development of a fruit-based snack for children. *Journal of Food Engineering*, 220, 65-75.
- DIAZ, J. V. (2013). *US10092030B2 - Method for the production of edible objects using SLS and food products - Google Patents*. <https://patents.google.com/patent/US10092030B2/en>
- GUO, C., ZHANG, M., & BHANDARI, B. (2019). A comparative study between syringe-based and screw-based 3D food printers by computational simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 397-404.
- HECKL, M. P., KORBER, M., JEKLE, M., & BECKER, T. (2023). Relation between deformation and relaxation of hydrocolloids-starch based bio-INKs and 3D printing accuracy. *Food Hydrocolloids*, 137, 108326.
- HERTZLER, S. R., LIEBLEIN-BOFF, J. C., WEILER, M., & ALLGEIER, C. (2020). Plant proteins: Assessing their nutritional quality and effects on health and physical function. *Nutrients*, 12(12), 3704.

- JIANG, H., ZHENG, L., ZOU, Y., TONG, Z., HAN, S., & WANG, S. (2018). 3D food printing: main components selection by considering rheological properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(14), 2335-2347.
- KEERTHANA, K., ANUKIRUTHIKA, T., MOSES, J., & ANANDHARAMAKRISHNAN, C. (2020). Development of fiber-enriched 3D printed snacks from alternative foods: A study on Button Mushroom. *Journal of Food Engineering*, 287, 110116.
- LING, K. C., YEE, A., LEO, C. H., & CHUA, C. K. (2022). Understanding 3D food printing Technology: An affordance approach. *Materials Today: Proceedings*, 70, 622-626.
- LIU, Z., ZHANG, M., BHANDARI, B., & WANG, Y. (2017). 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science and Technology*, 69, 83-94.
- NIU, D., ZHANG, M., TANG, T., MUJUMDAR, A. S., & LI, J. (2023). Investigation of 3D printing of children starch gummies with precise and special shape based on change of model parameters. *Journal of Food Engineering*, 356, 111568.
- SCHUBERT, C., VAN LANGEVELD, M. C., & DONOSO, L. A. (2013). Innovations in 3D printing: A 3D overview from optics to organs. *British Journal of Ophthalmology*, 98(2), 159-161.
- SUN, J., ZHOU, W., LIANGKUN, Y., HUANG, D., & LIN, L. (2018). Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*, 220, 1-11.
- PÄIVÄRINTA, E., ITKONEN, S. T., PELLINEN, T., LEHTOVIRTA, M., ERKKOLA, M., & PAJARI, A. (2020). Replacing Animal-Based proteins with Plant-Based proteins changes the composition of a whole Nordic Diet—A randomised clinical trial in healthy Finnish adults. *Nutrients*, 12(4), 943.
- QIN, P., WANG, T., & LUO, Y. (2022). A review on plant-based proteins from soybean: health benefits and soy product development. *Journal of agriculture and food research*, 7, 100265.