Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano

Departamento de Agroindustria Alimentaria

Ingeniería en Agroindustria Alimentaria

Proyecto Especial de Graduación

Capacidad de Impresión 3D de Tintas Alimentarias: A Base de Harina de Camote (*Ipomoea batatas*) con Adición de Cochayuyo (*Durvillaea antarctica*) y/o Espirulina (*Arthrospira platensis*).

Estudiante

Zabdi Ordoñez

Asesores

Sandra Espinoza, M.Sc.

Roberto Lemus, Ph.D.

Honduras, noviembre 2024

Autoridades

SERGIO ANDRÉS RODRÍGUEZ ROYO

Rector

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

ADELA M. ACOSTA MARCHETTI

Directora Departamento de Agroindustria Alimentaria

JULIO NAVARRO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros 5

Índice de Figuras 6

Índice de Anexos 7

Resumen 9

Abstract 10

Introducción 11

Materiales y Métodos 13

Localización del Estudio 13

Diseño Experimental 13

Fases Experimentales 14

Fase 1. Producción e Impresión de Tintas Alimentarias 14

Fase 2. Análisis Físicos y Químicos 18

Análisis Estadístico 24

Resultados y Discusión 25

Impresión 3D 25

Fidelidad de Impresión 25

Calidad de Impresión 28

Tasa de Deformación 36

Elección de Mejores Tintas Alimentarias 41

Reología 41

Viscosidad Aparente 41

Curvas de Flujo 43

Barrido de Frecuencia 46

Análisis del Perfil de Textura TPA 50

Compuestos Bioactivos 52

Polifenoles Totales 52

Actividad Antioxidante 53

Conclusiones 56

Recomendaciones 57

Referencias 58

Anexos 63

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Descripción del diseño experimental de las tintas alimentarias. 14

Cuadro 2 Formulaciones de las tintas alimentarias. 17

Cuadro 3 Descripción de tratamientos de las tintas alimentarias a base de harina de camote obtenida por tres métodos de secado, dos tamaños de partícula y adición de cochayuyo o espirulina. 17

Cuadro 4 Descripción de tratamientos de las tintas alimentarias a base de harina de camote obtenida por tres métodos de secado y mezcla de adición de cochayuyo y espirulina. 17

Cuadro 5 Fidelidad de las estructuras impresas respecto al modelo digital con tintas alimentarias a base de camote con adiciones de cochayuyo o espirulina..... 26

Cuadro 6 Fidelidad de las estructuras impresas respecto al modelo digital con tintas alimentarias a base de camote con adiciones de cochayuyo y espirulina. 28

Cuadro 7 Visualización de imágenes y medidas de precisión para la evaluación de la calidad de impresión de tintas alimentarias a base camote con adiciones de cochayuyo o espirulina. 30

Cuadro 8 Visualización de imágenes y medidas de precisión para la evaluación de la calidad de impresión de tinta de camote con mezcla de adición de cochayuyo y espirulina. 35

Cuadro 9 Tasa de deformación de cubos impresos 3D con tintas alimentarias a base de camote con adiciones de cochayuyo o espirulina después de 2 horas a temperatura ambiente..... 39

Cuadro 10 Tasa de deformación de cubos impresos 3D con tintas alimentarias a base de camote con mezcla de adición de cochayuyo y espirulina después de 2 horas a temperatura ambiente. 40

Cuadro 11 Tintas alimentarias seleccionadas para pasar a la Fase 2. 41

Cuadro 12 Valores de R^2 de los distintos modelos reológicos comparados. 45

Cuadro 13 Parámetros reológicos del modelo Ostwald de Waele de las tintas impresas 3D. 45

Cuadro 14 Parámetros de textura de las tintas impresas en 3D. 52

Cuadro 15 Contenido de polifenoles totales y actividad antioxidante (DPPH y ORAC) de las tintas alimentarias..... 55

Índice de Figuras

Figura 1 Diagrama de flujo para la obtención de harina de camote (Ipomoea batatas). 15

Figura 2 Diagrama de flujo para la obtención de harina de cochayuyo (Durvillaea antarctica). 16

Figura 3 Diagrama de flujo de impresión 3D de las tintas alimentarias. 18

Figura 4 Diagrama de flujo de análisis hechos a la tinta alimentaria y modelos impresos 3D. 23

Figura 5 Visualización de imágenes para la evaluación de la calidad de impresión de tintas alimentarias a base camote con adiciones de cochayuyo o espirulina. 32

Figura 6 Visualización de imágenes para la evaluación de la calidad de impresión de tinta de camote con mezcla de adición de cochayuyo y espirulina. 36

Figura 7 Viscosidad aparente de las tintas de impresión 3D. 43

Figura 8 Curva de flujo de las tintas de impresión 3D. 46

Figura 9 Módulo de almacenamiento (G'). 48

Figura 10 Módulo de pérdida (G"). 49

Figura 11 Tangente de pérdida (tan δ)..... 50

Índice de Anexos

Anexo A Diagrama de flujo para la obtención de harina de camote por diferentes métodos de secado. 63

Anexo B Diagrama de flujo de tamizado de la harina de camote obtenida por diferentes métodos de secado. 64

Anexo C Diagrama de flujo para la obtención de harina de cochayuyo y espirulina en polvo.Anexo D Diagrama de flujo para impresión de tintas alimentarias. 65

Anexo E Diagrama de flujo de análisis químicos realizados a las estructuras impresas en 3D. 67

Anexo F Diagrama de flujo de análisis físicos realizados a las tintas y estructuras impresas en 3D. 67

Anexo G Medidas de los cubos hechos con adición de cochayuyo o espirulina inmediatamente después de la impresión. 69

Anexo H Medidas de los cubos hechos con adición de cochayuyo y espirulina inmediatamente después de la impresión. 70

Anexo I Medidas de los cubos hechos con adición de cochayuyo o espirulina después de 2 h a temperatura ambiente. 71

Anexo J Medias de los cubos hechos con adición de cochayuyo y espirulina después de 2 h a temperatura ambiente. 72

Anexo K Interacción de factores en análisis de cubos impresos en 3D 73

Anexo L Resultados de análisis de medidas repetidas en el tiempo a las 0 y 2 horas de las estructuras impresas en 3D. 74

Anexo M Datos de los resultados del reómetro sobre la viscosidad aparente de las tintas alimentarias. 75

Anexo N Datos de los resultados del reómetro sobre la curva de flujo de las tintas alimentarias. 76

Anexo O Datos de los resultados del reómetro sobre el módulo de almacenamiento (G') de las tintas alimentarias. 77

Anexo P Datos de los resultados del reómetro sobre el módulo de perdida (G'') de las tintas alimentarias. 78

Anexo Q Datos de los resultados del reómetro sobre la tangente de pérdida (tan δ) de las tintas alimentarias..... 79

Anexo R Distintos modelos impresos con las tintas alimentarias estudiadas. 80

Anexo S Impresión fallida solo con camote. 81

Resumen

El aumento en la demanda alimentaria ha generado un incremento en los desechos de frutas y verduras, a pesar de su valor nutricional. En este estudio se investigó una solución innovadora, la transformación de estos desechos en tintas alimentarias para impresión 3D. Se evaluó el efecto de añadir cochayuyo (*Durvillaea antarctica*) y/o espirulina (*Arthrospira platensis*) a tintas de harina de camote (*Ipomoea batatas*), obtenida mediante tres métodos de secado (liofilización, horno convectivo y horno túnel asistido por infrarrojos) y dos tamaños de partícula (0.355 mm y 0.500 mm), en la capacidad de impresión 3D. Inicialmente se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial 3 × 2 × 2, se realizó un análisis de varianza y una prueba Duncan ($P < 0.05$). La calidad de impresión se evaluó a las 0 y 2 horas. Los resultados mostraron que el tipo de secado y la adición influyeron en la fidelidad y deformación de las impresiones, siendo la granulometría el factor principal en la deformación. Se eligieron las tres mejores tintas para análisis fisicoquímicos. Las tintas presentaron un comportamiento pseudoplástico, la adición de cochayuyo aumentó el esfuerzo de corte (τ) y viscosidad (K), y con espirulina aumentó la adhesividad y masticabilidad. En cuanto a polifenoles totales, utilizar solo cochayuyo o espirulina mostraron 38.27 y 37.66 mg EAG/g^{-1} DW; mostrando antagonismo al combinar ambos. Para la actividad antioxidante, DPPH mostró mejores resultados con harina de camote LF, para el método ORAC se presentó sinergia al adicionar cochayuyo y espirulina.

Palabras clave: Algas verde-azules, compuestos bioactivos, extrusión 3D, sostenibilidad, tecnología alimentaria.

Abstract

The increased demand for food has led to a rise in fruit and vegetable waste, despite their nutritional value. This study explored an innovative solution, transforming this waste into food-grade inks for 3D printing. The effect of adding cochayuyo (*Durvillaea antarctica*) and/or spirulina (*Arthrospira platensis*) to sweet potato flour inks (*Ipomoea batatas*), obtained through three drying methods (freeze-drying, convective oven, and infrared-assisted tunnel oven) and two particle sizes (0.355 mm and 0.500 mm), on 3D printing performance was evaluated. Initially, a Completely Randomized Design (CRD) with a 3 × 2 × 2 factorial arrangement was used, and the analysis of data was done through an ANOVA, and a Duncan's test ($P < 0.05$). The printing quality was assessed at 0 and 2 hours. Results showed that the drying method and the addition of ingredients influenced printing fidelity and deformation, with particle size being the main factor affecting deformation. The top three inks were selected for physicochemical analysis. The inks exhibited pseudoplastic behavior, with cochayuyo increasing shear stress (τ) and viscosity (K), while spirulina increased adhesiveness and chewiness. Regarding total polyphenols, using only cochayuyo or spirulina yielded 38.27 and 37.66 mg GAE/g^{-1} DW, respectively, showing antagonism when both were combined. For antioxidant activity, DPPH showed better results with LF sweet potato flour, while the ORAC method revealed synergy when adding cochayuyo and spirulina.

Keywords: 3D extrusion, bioactive compounds, blue-green algae, food technology, sustainability.

Introducción

Con el aumento de la demanda de alimentos para la creciente población, incrementa la generación de desechos. Un informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2022) señala que: “un tercio de los alimentos producidos se desperdicia cada año”. Las frutas y verduras experimentan las tasas de desperdicio más altas, alcanzando un 45% de pérdida, lo que equivale a 585 millones de toneladas anuales (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2022). En el campo y durante el procesamiento, muchas se descartan por su apariencia "fea o imperfecta". A pesar de contar con los mismos valores nutricionales que sus contrapartes aceptadas, estas frutas y verduras nunca llegan al mercado debido a su mala apariencia (González, 2018).

No obstante, existe una solución innovadora para rescatar estos productos imperfectos, transformándolos en ingredientes alternativos para alimentos impresos en 3D, siempre y cuando la tinta alimentaria final cumpla con los parámetros reológicos de extrusión establecidos (Del Castillo Morgado, 2020). Esta iniciativa no solo reduce el desperdicio alimentario, sino que también promueve la utilización eficiente de recursos al dar nueva vida a productos que de otro modo serían descartados únicamente por su aspecto externo.

La impresión 3D de alimentos ha emergido como una innovación disruptiva que redefine la manera en que concebimos, diseñamos y consumimos productos alimenticios. Mediante la extrusión controlada de ingredientes alimentarios, la impresión 3D permite la creación de estructuras alimenticias complejas y diseños personalizados, brindando la posibilidad de adaptar la textura, forma y composición de los alimentos de acuerdo con las necesidades específicas de los consumidores (McHugh, 2017). Esta tecnología no solo ofrece un potencial ilimitado para la innovación en la presentación de alimentos, sino que también puede desempeñar un papel crucial en la mejora de la eficiencia de la cadena de suministro alimentaria y la reducción de desperdicios, al imprimir solo la cantidad necesaria de materia prima (Ricci et al., 2019).

Los ingredientes seleccionados para este estudio fueron: camote (*Ipomoea batatas*),

cochayuyo (*Durvillaea antarctica*) y espirulina (*Arthrospira platensis*). El camote rico en almidón, se propuso como la base principal debido a sus propiedades reológicas y de gelificación, estas pueden mejorar la cohesión y estabilidad del material durante la extrusión, elementos cruciales para la formación de productos alimenticios tridimensionales (C. He et al., 2020). Asimismo, se incluyeron tres métodos de secado para obtener la harina de camote: Horno convectivo por su relación costo-beneficio, horno túnel de convección asistido con infrarrojo y liofilización por ser eficaces en la conservación de nutrientes; estos podrán influir en las propiedades físicas y químicas de la harina resultante, lo cual impactará directamente en las características de impresión 3D de las tintas alimentarias.

Por otro lado, la inclusión de cochayuyo busca aprovechar las propiedades gelificantes de los alginatos presentes en esta alga marina. De acuerdo con Vásquez (2023), el alginato presente en el cochayuyo ha demostrado ser valioso en la producción de geles alimentarios, destacando su potencial aplicación en la mejora de las propiedades físicas de productos impresos en 3D.

Respecto a la espirulina destaca por ser una fuente rica en proteínas de alta calidad, vitaminas, especialmente la B12, y pigmentos antioxidantes. Estos antioxidantes ofrecen protección contra el estrés oxidativo y contribuyen a la salud celular. Además de sus beneficios para la salud, la espirulina ha demostrado poseer propiedades gelificantes gracias a sus polisacáridos, lo que la convierte en un ingrediente versátil en la impresión 3D de alimentos (Fredricks et al., 2021).

Basado en lo anterior, se establecieron los siguientes objetivos del estudio:

Evaluar el efecto del tipo de secado, tamaño de partícula y adición de cochayuyo y/o espirulina en la capacidad de impresión 3D de tintas alimentarias a base de harina de camote.

Evaluar las propiedades reológicas y texturales de las tintas alimentarias.

Cuantificar el contenido de polifenoles totales y la actividad antioxidante de las tintas alimentarias.

Materiales y Métodos

Localización del Estudio

El estudio se llevó a cabo en los laboratorios de Ingeniería de Procesos y Química de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, de la Universidad de Chile, esto incluyendo el desarrollo, formulación y evaluación de muestras, asimismo, los análisis físicos y químicos. Dichas instalaciones se encuentran ubicadas en la calle Dr. Carlos Lorca Tobar 964, comuna Independencia de la Región Metropolitana de Santiago, Chile.

Diseño Experimental

En este estudio, para realizar las tintas alimentarias de la impresión 3D, se utilizaron tres métodos de secado para realizar harina de camote (liofilización, horno de convección y horno túnel de convección asistido con infrarrojo), con dos tamaños de partículas en la harina de camote (0.355 y 0.5 mm) y con la adición de (cochayuyo o espirulina) (Cuadro 1). Dicha investigación se realizó en 2 fases. En la primera fase, se produjeron las harinas utilizadas en las tintas alimentarias, harina de camote y cochayuyo, y se adquirió la espirulina en polvo. Posteriormente se realizó la impresión 3D con las tintas alimentarias, obteniendo 12 tratamientos (Cuadro 3), se realizaron 3 repeticiones para aumentar la significancia del estudio, con un total de 36 unidades experimentales.

Adicionalmente, para cada uno de los tres métodos de secado de harina de camote con un tamaño de partícula de 0.5 mm se evaluó la combinación de cochayuyo y espirulina, obteniéndose 3 tratamientos y, nuevamente se realizaron 3 repeticiones, obteniéndose 9 unidades experimentales. Al finalizar la primera fase, se eligieron las mejores tres tintas alimentarias. En la segunda fase (Cuadro 4), se utilizaron las mejores 3 tintas alimentarias seleccionadas y según correspondiera, se realizaron los análisis fisicoquímicos y de estructuras impresas en 3D. Para cada uno de los 3 tratamientos se realizaron 3 repeticiones en cada análisis, obteniéndose un total de 9 unidades experimentales.

Cuadro 1

Descripción del diseño experimental de las tintas alimentarias.

Factores	Unidad	Variable
Secado (Camote)		Liofilizador Horno de convección Horno túnel de convección asistido con infrarrojo
Tamaños de partícula (Camote)	mm	0.500 0.355
Adición		Cochayuyo Espirulina

Fases Experimentales

Fase 1. Producción e Impresión de Tintas Alimentarias

Camote.

Selección y Recepción de Materia Prima. El camote se compró en el mercado local "La Vega", luego se trasladaron al laboratorio de Ingeniería de Procesos, donde el producto fue lavado, fue pelado y cortado en trozos de 1.5 mm × 1.5 mm, 1/3 del camote se llevó al congelador durante 24 horas a una temperatura de -15 °C para su posterior secado en liofilizador.

Secado. El camote fue secado por tres diferentes métodos (Anexo A): en horno de convección Heraeus Instruments GmbH (63450 Hanau, Alemania) (70 °C / 240 min), horno túnel de convección estático equipado con una lampara de infrarrojo, el cual fue diseñado y construido en el Departamento de Ciencia de Alimentos y Tecnología Química (Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile) (70 °C / 270 min), con una potencia de infrarrojo de 500 watts, la velocidad del aire fue de 2.4 m/s, la cual fue medida con un anemómetro AM-4836V, el camote congelado fue liofilizado en SUMTRON (CTFD-18P) por (2,880 min) (Figura 1). Al finalizar el secado, el producto se dejó enfriar dentro de un desecador para luego ser molido.

Humedad. Se determinó según el método y Ecuación 1 (H. He et al., 2023), se pesaron 4 g de muestra, se utilizó un horno de convección 100-105 °C, donde el aire caliente circula alrededor de la muestra para obtener su nivel de humedad.

$$\%Humedad = \frac{Pi-Pf}{Pi} \times 100 \quad [1]$$

Donde:

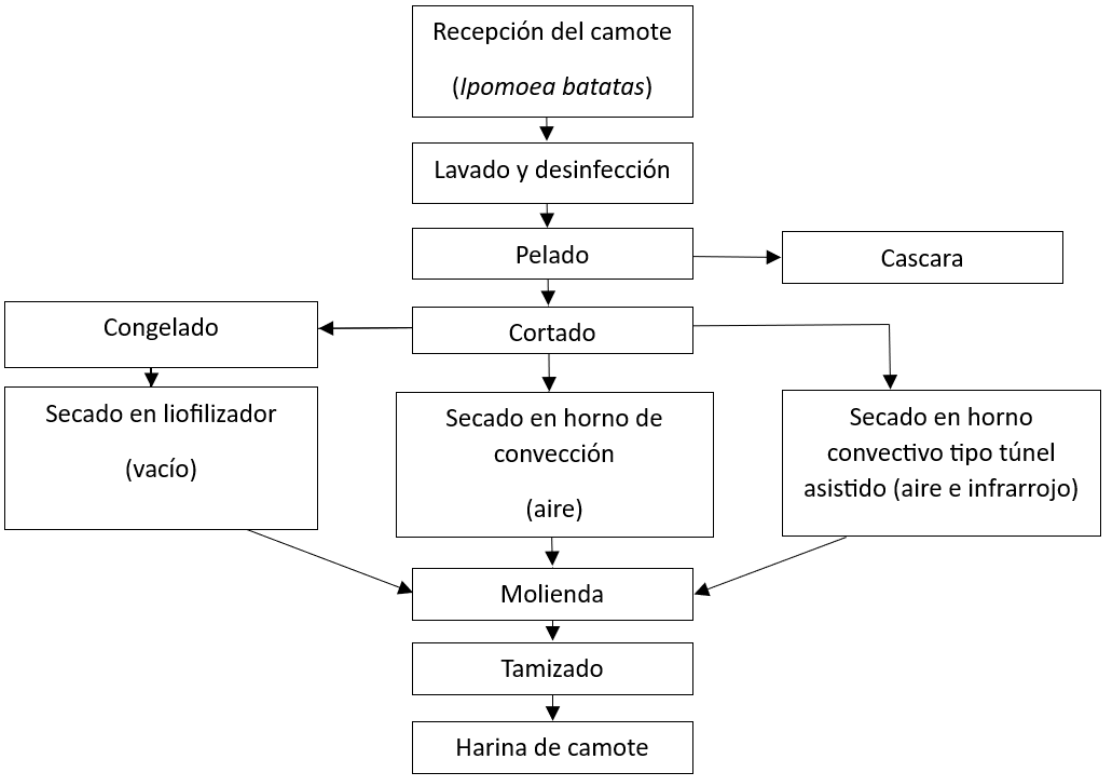
Pi = Peso inicial

Pf = Peso final

Molido y Tamizado. Se usó un molino ultra centrifugo (ZM 200 – RETSCH) a 10,000 rpm/min con un tamaño de partícula de 0.5mm. Seguidamente, la molienda fue dividida en dos partes iguales, al haber obtenido un tamaño de partícula en el molino (≤ 0.5 mm), la molienda restante se pasó por un tamiz de 0.355 mm, obteniendo así, harina de camote con dos diferentes tamaños de partículas (Anexo B).

Figura 1

Diagrama de flujo para la obtención de harina de camote (Ipomoea batatas).



Cochayuyo.

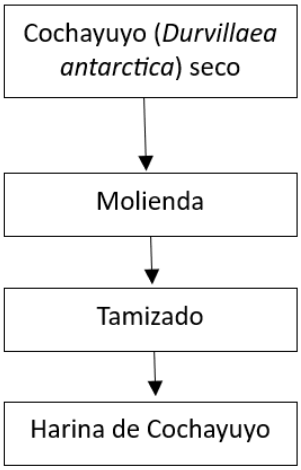
Selección de Materia Prima. El cochayuyo marca AgroUno fue comprado en el supermercado "Jumbo", el cual viene seco y en trozos en una presentación de 80 g, este fue llevado al laboratorio de

Ingeniería de Procesos; dicha alga fue cortada en trozos más pequeños, esto para que tenga un tamaño ideal de poder pasar por la entrada del molino ultra centrífugo (Figura 2).

Molido y tamizado. Los trozos de cochayuyo fueron procesados en un molino ultra centrifugo (ZM 200 – RETSCH) a 10,000 rpm/min con un tamaño de partícula de salida de 0.500 mm (Anexo C), al obtener la harina, se pasó por un tamiz, obteniendo una partícula de ≤ 0.355 mm.

Figura 2

Diagrama de flujo para la obtención de harina de cochayuyo (Durvillaea antarctica).



Espirulina

Dicho producto fue comprado en Laboratorio FNL, la presentación es Spirulina en polvo de 500 g, este ingrediente se utilizó tal y como viene envasado, no se le hizo ninguna modificación.

Preparación de la Tinta. Para la elaboración de la mezcla/tinta alimentaria destinada a imprimir, se modificó una formulación propuesta por (Vásquez, 2023) donde utilizaron otros 15 g de harina de arroz + 45 mL de agua, se realizaron ensayos partiendo de una mezcla 15 g de harina de camote + 45 mL de agua, posteriormente, se obtuvieron las formulaciones indicadas en el Cuadro 2 y la descripción de tratamientos mostrados en el Cuadro 3, dichos ingredientes se mezclaron por 5 min hasta obtener una mezcla homogénea (Figura 3).

Cuadro 2

Formulaciones de las tintas alimentarias.

Composición	Harina de camote (g)	Harina de cochayuyo (g)	Espirulina en polvo (g)	Agua (mL)
HC + C	10.18	8.32	0	40
HC + E	7.4	0	11.1	40
HC + C + E	8.78	4.16	5.55	40

Nota. HC: Harina de camote; C: Cochayuyo; E: Espirulina.

Cuadro 3

Descripción de tratamientos de las tintas alimentarias a base de harina de camote obtenida por tres métodos de secado, dos tamaños de partícula y adición de cochayuyo o espirulina.

Nombre del tratamiento	Secado de camote (harina)	Granulometría de harina de camote (mm)		Adición
LC2	Liofilización	0.355		Cochayuyo
LE3			0.500	Espirulina
LE4		0.355		Cochayuyo
LC5			0.500	Espirulina
CC6	Horno de convección	0.355		Cochayuyo
CE7			0.500	Espirulina
CE8		0.355		Cochayuyo
CC9			0.500	Espirulina
IC10	Horno túnel de convección asistido con infrarrojo	0.355		Cochayuyo
IE11			0.500	Espirulina
IE12		0.355		Cochayuyo
IC13			0.500	Espirulina

Cuadro 4

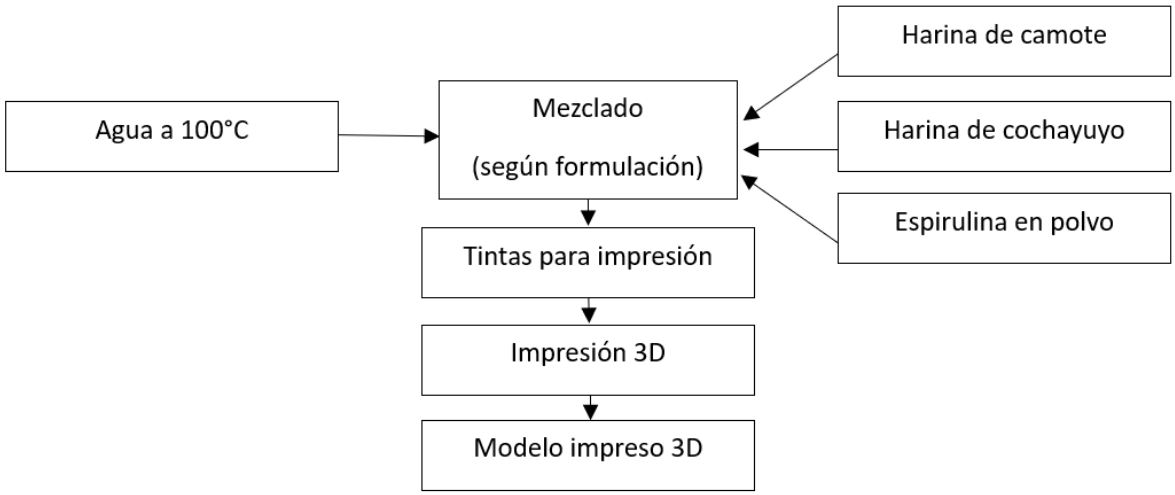
Descripción de tratamientos de las tintas alimentarias a base de harina de camote obtenida por tres métodos de secado y mezcla de adición de cochayuyo y espirulina.

Nombre del tratamiento	Secado de camote (harina)	Granulometría de harina de camote (mm)	Adición	
LCE14	Liofilización	0.5	Cochayuyo	Espirulina
CCE15	Horno de convección	0.5	Cochayuyo	Espirulina
ICE16	Horno túnel de convección asistido con infrarrojo	0.5	Cochayuyo	Espirulina

Impresión 3D. La tinta final fue introducida en una jeringa de 60 mL (Anexo D), la cual fue ensamblada en la impresora Food Bot S2, dicho equipo se programó para imprimir por medio de una boquilla de 0.8 mm de diámetro una figura de diseño cúbico de 20 × 20 × 20 mm a una velocidad de 30 mm/s, en un tiempo de 10 minutos y 18 segundos, la impresora se fundamenta en el proceso de extrusión de material con posicionamiento X-Y-Z para así imprimir de manera tridimensional, creando capa sobre capa.

Figura 3

Diagrama de flujo de impresión 3D de las tintas alimentarias.



Fase 2. Análisis Físicos y Químicos

Estructuras Impresas 3D.

Precisión de Impresión 3D de las Tintas Alimentarias. Estas evaluaciones fueron tomadas en cuenta para elegir las mejores 3 impresiones, a las que, después, se les realizó análisis físicos y químicos (Figura 4).

Se tomaron fotografías a las estructuras inmediatamente después de haber sido impresas y 1 hora después de la impresión para evaluar la apariencia del producto. Como características principales de las muestras impresas 3D, se midieron altura (h), profundidad (P), la cual será dividida en profundidad superior (Ps) y profundidad inferior (Pi), en cuanto a la longitud, también será dividida en

superior (Ls) e inferior (Li), ya que, el grosor inferior debe ser mayor en 1.5 mm que el lado superior, esto para brindar mayor estabilidad a la figura. La altura, profundidad y longitud se medió con un pie de rey digital profesional Brooklyn 150 mm, para luego calcular el porcentaje de cambio que haya respecto a las medidas del modelo digital 3D.

Fidelidad de Impresión 3D de las Estructuras Impresas en Comparación al Modelo Digital.

Otro factor importante para las tecnologías de impresión de alimentos en 3D es la fidelidad, que es la coincidencia de una forma recién impresa en 3D con su modelo CAD (Computer Aided Design) utilizado para la impresión, para evaluar este elemento se utilizaron las Ecuaciones 2, 3 y 4 descritas por Zhao et al., (2024).

$$Fidelidad\ Altura\ (\%) = \left(1 - \left(\frac{Hc+Ha}{Hc}\right)\right) \times 100 \quad [2]$$

$$Fidelidad\ Profundidad\ (\%) = \left(1 - \left(\frac{Hc+Ha}{Hc}\right)\right) \times 100 \quad [3]$$

$$Fidelidad\ Longitud\ (\%) = \left(1 - \left(\frac{Hc+Ha}{Hc}\right)\right) \times 100 \quad [4]$$

Donde Hc es el parámetro establecido por el tamaño del modelo digital (20 mm), respectivamente, Ha son los valores medidos de la altura, profundidad y longitud de la impresión, medidos a las estructuras a las 0 h.

Rango de Deformación de Impresión 3D Luego de 2 h. Para el rango de deformación de las muestras fue utilizada una ecuación propuesta por Chen et al., (2022), mostrada en la Ecuación 5, donde se tuvieron que medir las deformaciones ocurridas en las figuras impresas 3D luego de 2 h, en condiciones de temperatura ambiente.

$$Rango\ de\ deformación = \frac{2\Delta Ps + \Delta h}{2Ps + h} \quad [5]$$

Donde Ps (mm) y h (mm) representan la profundidad superior y la altura de la estructura impresa en 3D, ΔPs (mm) y Δh (mm) indican la diferencia en profundidad superior y altura entre la estructura impresa y la estructura después de un período de tiempo a temperatura ambiente. Se optó a utilizar exclusivamente la profundidad superior de los cubos para esta medida, ya que es la más

representativa al ser del mismo tamaño que en el modelo 3D y deberá mostrar una variación más significativa después de 2 horas, en cambio, Pi tiende a ser más grueso y estable al encontrarse en la base de la estructura, dichas mediciones se llevaron a cabo por duplicado.

Calidad de impresión 3D de las Tintas Alimentarias. También, se evaluó la calidad de impresión de todas las muestras, considerando distintos ingredientes y concentraciones para elegir las que resulten visualmente más aceptables. La evaluación de calidad se realizó siguiendo el método propuesto por Yuntao Liu et al. (2020) donde se evaluó visualmente la calidad de impresión en una escala del 1 al 5, siendo 1 considerado como muy mala y 5 como muy buena, dicho análisis se realizó por triplicado. Los productos con una calidad de impresión superior a 3 se consideraron como excelentes y aceptables. En la evaluación de la calidad de impresión, se tomó en cuenta tanto la precisión de impresión como el rango de deformación de impresión.

Análisis Reológico. Los análisis reológicos fueron hechos en condiciones de presión atmosférica y temperatura ambiente. Las mediciones se realizaron en el equipo HAAKE RheoStress 1, utilizando el sensor plato-plato PP35 Ti con una separación de medición de 1 mm. Todos los datos se tomaron en triplicado (Anexo F).

Curva de Flujo. Se realizaron curvas de flujo considerando un rango de 0.01 - 10 s^{-1} para describir el comportamiento de la viscosidad aparente y reológico de las muestras. Las curvas de cada una de las muestras se ajustaron al modelo reológico que mejor describa su comportamiento utilizando el software RheoWin 4 Data Manager propio del reómetro.

Barrido de Frecuencia. El análisis de barrido de frecuencia se realizó en un rango de 0.1 a 10 Hz para determinar el comportamiento de las muestras, así, se logró apreciar si predomina un comportamiento viscoso o elástico, mediante un módulo de almacenamiento G’ (indicador del comportamiento elástico) y módulo de pérdida G” (indicador del comportamiento de la viscosidad).

Perfil de Textura. Se realizó a los productos impresos utilizando el equipo TA.XTplusC (Stable Micro System Ltd.) con una sonda cilíndrica TA-30 aluminio (30 mm de radio y 10 mm de alto), el equipo se configuró para dos ciclos de compresión. Las muestras utilizadas se imprimieron en forma

de cubos. Las condiciones del análisis fueron las mencionadas (Yaowei Liu et al., 2019): velocidad de la prueba y velocidad posterior de la prueba 1 mm/s, fuerza de activación 5 g y compresión de 50% de la altura original. Se determinaron los parámetros de dureza, adhesividad, elasticidad, cohesión, gomosidad, resiliencia y la masticabilidad. Cada muestra se analizó por triplicado y los resultados se expresaron como la media ± desviación estándar.

Compuestos Bioactivos.

Obtención del Extracto Etanólico de las Tintas Alimentarias. El extracto etanólico se obtuvo mediante el método de extracción asistida por ultrasonido utilizada por Jiménez-Moreno et al. (2019) con el equipo Sonics VCX-750 Vibra-Cell. Se utilizó un solvente agua:etanol (67.5 mL agua : 32.5 mL etanol) a temperatura ambiente 25 °C. Posteriormente para la preparación del solvente, se pesó 10 g de cada tinta alimentaria y se le agregó al solvente. A continuación, se utilizó un equipo de ultrasonido Sonics VCX-750 Vibra-Cell durante 20 minutos a una amplitud de 90%, a temperatura ambiente 25 a 35 °C. Finalmente, las muestras fueron filtradas con ayuda de una bomba de vacío (Dlab C410) (Anexo E).

Polifenoles Totales. Para determinar el contenido de polifenoles totales, se utilizó la metodología propuesta por Jiménez-Moreno et al. (2019). En un matraz aforado de 10 mL, se colocaron 0.1 mL de muestra y 4.9 mL de agua, luego se añadió 0.5 mL de Folin-Ciocalteau y se dejó reposar por 3 minutos. Posteriormente se agregó 1.7 mL de carbonato de sodio al 20%, se mezcló y aforó la muestra a 10 mL con agua destilada. Se esperaron 30 minutos y se leyó en el espectrofotómetro (SP-UV 1000 DLAB) a 765 nm, contra un blanco preparado en las mismas condiciones de la muestra. Se construyo una curva de calibración de ácido gálico con concentraciones de 50, 100, 250, 500 y 800 ppm (R^2=0.9993). Los resultados fueron expresados en miligramos de ácido gálico por 100 g de materia seca (mg EAG/100 g de materia seca).

Capacidad Antioxidante.

DPPH. La capacidad antioxidante del extracto etanólico de las tintas alimentarias se midió en términos de la capacidad de DPPH (depleción del óxido 2,2-difenil-1-picrilhidrazil) donde a mayor

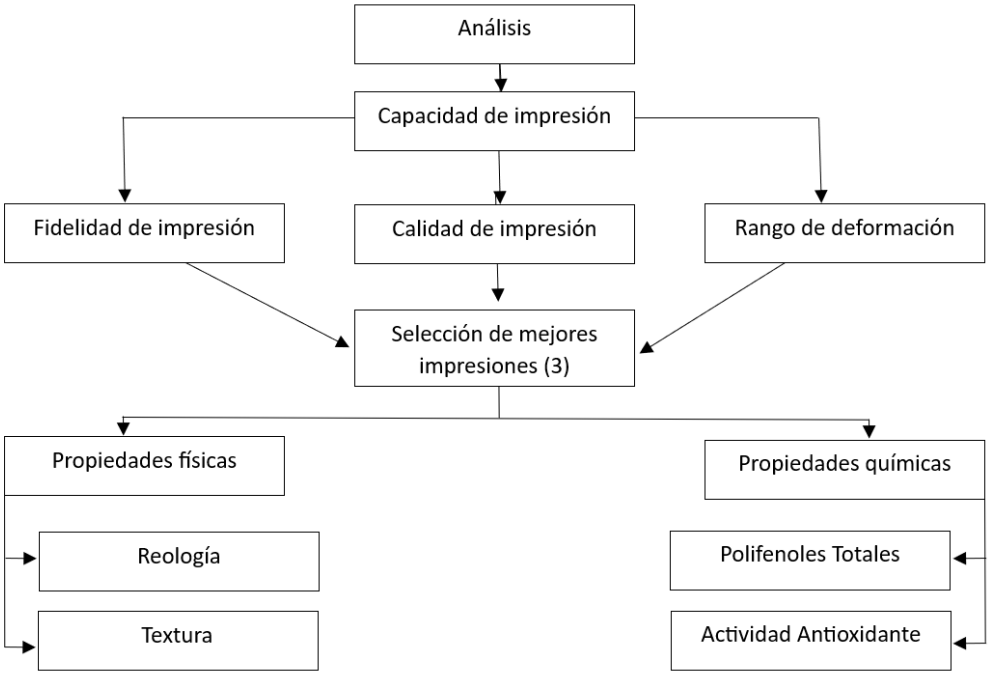
capacidad antioxidante mayor decoloración del radical DPPH, dado que hay una mayor unión de este radical a los antioxidantes de la muestra (Baliyan et al., 2022). Se preparó una solución madre metanólica del radical DPPH (0.010 g DPPH en un matraz de 10 mL y se aforó con etanol). Seguidamente se preparó una curva de Trolox con concentraciones de 10, 25, 50, y 100 ppm (R^2=0.9955). Posteriormente en tubos de 10 mL (envueltos en papel alusa) se agregó 0.1 mL de cada extracto y 3.9 mL de DPPH. Cada muestra de extracto tiene su propio blanco, este se preparó con 0.15 mL de extracto y 5.85 mL de etanol. Los tubos se dejaron en oscuridad por 30 min a temperatura ambiente, transcurrido ese tiempo se leyó en espectrofotómetro (SP-UV 1000 DLAB) a 517 nm contra un blanco. Los 6 mL de blanco se realizarón dado que se debe hacer en base cero, por lo que en cada cubeta debía ir 3 mL aproximadamente y luego leer la muestra que reaccionó con el DPPH. Los resultados se expresaron en micromoles de equivalente Trolox por gramo de muestra seca (µM ET/ g de materia seca).

ORAC. También se determinó la capacidad antioxidante del extracto etanólico de las tintas alimentarias por medio del método ORAC (capacidad de absorción de radicales de oxígeno) según la metodología utilizada por Aravena-Sanhueza et al. (2020). Para la solución buffer fosfato se pesaron 8.06 g de cloruro de sodio, 0.22 g de cloruro de potasio, 1.15 g de disodio hidrógeno fosfato y 0.20 g de dihidrógeno fosfato de potasio para un litro de agua miliq y se ajustó pH de esta solución a 7.00 con hidróxido de sodio 10%. Luego, se preparó la solución stock de fluoresceína, se pesarón 25 mg de fluoresceína en un matraz aforado de 50 mL, la cual se enraza y disuelve con buffer fosfato. Respecto a la solución del radical AAPH la relación peso/volumen fue de 46 mg/mL. Seguidamente se preparó la solución stock de estándar trolox, se pesarón 25 mg en un matraz aforado ámbar de 50 mL, se homogenizó y aforó con buffer fosfato. Se construyó una curva de calibración de trolox con concentraciones de 12.5, 25, 50 y 100 µM (R^2=1) Para la preparación de pocillos donde se hará la lectura todos los reactivos debían estar tibios (calentarlos en el baño termorregulador antes de llenar la placa). La placa se llenó de la siguiente manera: 300µL de agua en todos los bordes de la placa marca NUNC. En los primeros pocillos se llenan los puntos de la curva (25 µL), cada punto se repite cuatro

veces para el lado empezando de la concentración de 100 µM, 50 µM, 25µM y 12 µm. Luego se siguió con las muestras (25 µL), mínimo 6 veces por cada muestra para el lado. Luego se agrega 25µL de buffer en las dos últimas líneas de la placa F2 a F11 y de G2 a G11. Seguidamente se agrega a toda la placa excepto a la que tiene agua, 150 µL de fluoresceína para muestras, curva y buffer. El equipo automáticamente le agrega el radical que es el AAPH (25 µL). Finalmente se colocó la placa en el equipo lector de fluoresceína (FLX 800 TBID) para proceder con la lectura. Los resultados fueron expresados en micromoles de equivalente trolox por gramo de muestra seca (µM ET/g de materia seca).

Figura 4

Diagrama de flujo de análisis hechos a la tinta alimentaria y modelos impresos 3D.



Análisis Estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados en el programa SAS® (Statistical Analysis System) en linea, en la primera fase se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con un arreglo factorial 3 × 2 × 2, se implementó un análisis de varianza (ANDEVA) para determinar los efectos principales y las interacciones entre factores. De igual forma, se realizó una separación de medias DUNCAN con un nivel de significancia de 95% ($P < 0.05$). Para el análisis de calidad de impresión a las 0 y 2 h se utilizó medidas repetidas en el tiempo. Por otro lado, para las tintas alimentarias donde se combinó la adición de cochayuyo y espirulina, y en la segunda fase del estudio, se empleó un DCA con tres repeticiones.

Resultados y Discusión

Impresión 3D

Fidelidad de Impresión.

La fidelidad de las muestras impresas en 3D se evaluó de acuerdo con la precisión de impresión de la tinta alimentaria respecto al modelo digital, la estabilidad de la estructura impresa y la retención de la forma, se midió a las figuras inmediatamente después de haber sido impresas, siguiendo la metodología descrita por Zhao et al. (2024). El Cuadro 5 muestra el porcentaje de fidelidad que obtuvieron las impresiones realizadas respecto al modelo digital. Los resultados de las probabilidades de factores e interacción revelaron que la fidelidad en la altura estuvo principalmente influenciada por la interacción entre los factores de secado, adición y granulometría (P=0.0003). En orden de importancia, le siguieron los factores de adición (P=0.007) y secado (P=0.0485). Las tintas alimentarias LC2 e IC13 fueron diferentes estadísticamente ($P < 0.05$) de los tratamientos LE4 y CE7, pero no mostraron diferencias con el resto de los tratamientos.

En lo que respecta a la fidelidad en la profundidad, el factor más determinante fue el secado (P=0.0098), seguido de la adición (P=0.0109) y la interacción entre secado, adición y granulometría (P=0.0462). La muestra LC5 con harina de camote obtenida por LF con un tamaño de partícula de 0.5 mm y adición de cochayuyo presentó una mayor fidelidad en profundidad y diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$) respecto a las tintas CC6, CE7, IE11 e IE12. Savas (2022) consideró la LF un método seguro para el secado de frutas y vegetales sin que el calor dañe sus propiedades. La sublimación con hielo conduce a reducciones en la actividad del agua y el contenido de humedad sin dañar la textura y los atributos de la matriz alimentaria.

En la fidelidad del ancho, la adición tuvo una mayor interacción (P=0.0003), seguida por el secado (P=0.0085). La adición de cochayuyo y espirulina influenciaron este parámetro de fidelidad. Para las mediciones de fidelidad en ancho, la tinta alimentaria LC5 elaborada con harina de camote con un tamaño de partícula de 0.5 mm obtenida mediante LF y con adición de cochayuyo, mostró un mayor desempeño que las tintas CC6, CE7, CE8, IE11 e IE12 con diferencias estadísticamente

significativas (P < 0.05) las cuales obtuvieron los valores más bajos. Los resultados de LC5 se puede comparar con una investigación realizada por Grira et al. (2023) donde menciona que el alginato posee propiedades mecánicas que provee una alta fidelidad de forma en impresiones 3D de materiales a base de algas.

Cuadro 5

Fidelidad de las estructuras impresas respecto al modelo digital con tintas alimentarias a base de camote con adiciones de cochayuyo o espirulina.

Factores						
Secado	Adición	Granulometría (mm)	Muestra	Fidelidad altura (%) Media ± D.E.	Fidelidad profundidad (%) Media ± D.E.	Fidelidad ancho (%) Media ± D.E.
			Modelo Virtual	100	100	100
LF	Cochayuyo	0.355	LC2	100 ± 0.00 ^{a}	97.25 ± 1.75 ^{abcd}	98.58 ± 1.66 ^{abc}
LF	Espirulina	0.5	LE3	98.83 ± 0.58 ^{ab}	97.25 ± 1.29 ^{abcd}	97.25 ± 2.17 ^{abcd}
LF	Espirulina	0.355	LE4	93.83 ± 2.75 ^{c}	97.67 ± 1.70 ^{abcd}	97.08 ± 1.37 ^{abcd}
LF	Cochayuyo	0.5	LC5	99.33 ± 0.58 ^{ab}	99.83 ± 0.28 ^{a}	99.67 ± 0.28 ^{a}
HC	Cochayuyo	0.355	CC6	98.50 ± 1.00 ^{ab}	94.83 ± 1.04 ^{de}	96.00 ± 0.66 ^{cd}
HC	Espirulina	0.5	CE7	97.33 ± 1.15 ^{b}	93.17 ± 1.15 ^{e}	95.17 ± 2.08 ^{d}
HC	Espirulina	0.355	CE8	99.00 ± 0.50 ^{ab}	97.17 ± 3.60 ^{abcd}	95.33 ± 0.14 ^{d}
HC	Cochayuyo	0.5	CC9	98.83 ± 1.04 ^{ab}	97.42 ± 3.08 ^{abcd}	98.42 ± 1.37 ^{abc}
HC-IR	Cochayuyo	0.355	IC10	99.00 ± 0.87 ^{ab}	98.17 ± 1.89 ^{abc}	97.67 ± 2.67 ^{abcd}
HC-IR	Espirulina	0.5	IE11	99.17 ± 1.44 ^{ab}	96.33 ± 0.14 ^{bcd}	96.50 ± 0.00 ^{bcd}
HC-IR	Espirulina	0.355	IE12	98.67 ± 0.29 ^{ab}	95.00 ± 0.86 ^{cde}	96.17 ± 0.28 ^{cd}
HC-IR	Cochayuyo	0.5	IC13	99.83 ± 0.29 ^{a}	98.58 ± 1.23 ^{ab}	99.00 ± 1.0 ^{ab}
C.V (%)				1.11	1.76	1.40

Nota. Valor medio ± desviación estándar, a-d: Letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas (P < 0.05). C.V: Coeficiente de variación. LF: Liofilizador; HC: Horno convectivo; HC-IR: Horno túnel asistido con infrarrojo.

El Cuadro 6 detalla la fidelidad de las estructuras impresas en 3D utilizando harina de camote obtenida por LF, HC y HC-IR con una granulometría de 0.5 mm, junto con la adición de cochayuyo y espirulina. En cuanto a la fidelidad en la altura, las formulaciones LCE14 e ICE16 alcanzaron los mismos valores, sin diferencias significativas entre ellas (P > 0.05). No obstante, mostraron diferencias significativas (P < 0.05) de la muestra CCE15. Estos resultados indican que LCE14 e ICE16 lograron una mayor precisión en la fidelidad de altura en comparación con CCE15. Esto se pudo deber a que la liofilización preserva de manera eficiente la estructura celular del camote, manteniendo la capacidad

de retener agua y la integridad física, lo que mejora la calidad de impresión en 3D. Esta técnica es respaldada por estudios como el de Sobaszek et al. (2020), que evalúan las propiedades texturales y antioxidantes en productos alimentarios liofilizados, destacando su eficacia en la preservación de la estructura celular. Por otro lado, HC-IR, que aplica calor directamente a través de radiación infrarroja, permite un secado rápido y eficiente, manteniendo la estructura celular del camote. Un estudio relevante en este contexto es el de Santos et al. (2021), que muestra cómo el secado con infrarrojo preserva la estructura y calidad de productos alimentarios como la zanahoria, lo que se traduce en una mejor calidad de impresión en 3D. Por otro lado, se observó que HC afectó significativamente en CCE15. Según How y Siow (2020), el secado por convección afecta negativamente las cualidades físicas y químicas de los productos alimenticios.

En la fidelidad de profundidad la muestra CCE15 presentó diferencias estadísticamente significativamente ($P < 0.05$) en comparación a ICE16, lo que indicó una menor precisión en la fidelidad de profundidad para esta última formulación.

En lo que respecta a la fidelidad en el ancho, las muestras LCE14 y CCE15 presentaron valores sin diferencias estadísticamente significativas entre ellas ($P > 0.05$). En contraste, la muestra ICE16 registró diferencias significativas ($P < 0.05$) con respecto a LCE14 y CCE15. Estos resultados sugieren que la formulación ICE16 tuvo una menor precisión de fidelidad en el ancho de las impresiones en comparación con las otras formulaciones.

Según los resultados obtenidos en la fidelidad de profundidad y ancho sobre CCE15, este resultado pudo haberse visto influenciado por el secado HC. Según Xu et al. (2021) las harinas de tubérculos secadas por convección presentaron modificaciones físicas en la estructura de los gránulos de almidón, relacionadas con ciertos grados de disrupción sobre el mismo y entre los complejos que pudieran existir, iniciando una mayor solubilización y capacidad de absorción de agua, con la alta capacidad constante de poder de hinchamiento de los mismos.

Cuadro 6

Fidelidad de las estructuras impresas respecto al modelo digital con tintas alimentarias a base de camote con adiciones de cochayuyo y espirulina.

Factores						
Secado	Adición	Granulometría (mm)	Muestra	Fidelidad altura (%) Media ± D.E.	Fidelidad profundidad (%) Media ± D.E.	Fidelidad ancho (%) Media ± D.E.
LF	Cochayuyo + espirulina	0.5	LCE14	99.50 ± 0.50 [a]	98.50 ± 1.29 [ab]	99.00 ± 1.10 [a]
HC	Cochayuyo + espirulina	0.5	CCE15	98.67 ± 1.26 [b]	99.08 ± 0.14 [a]	99.08 ± 0.38 [a]
HC-IR	Cochayuyo + espirulina	0.5	ICE16	99.50 ± 0.50 [a]	95.08 ± 2.91 [b]	95.00 ± 2.00 [b]
C.V (%)				1.49	1.30	1.28

Nota. Valor medio ± desviación estándar, a-b: Letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas (P < 0.05). C.V: Coeficiente de variación. LF: Liofilizador; HC: Horno convectivo; HC-IR: Horno túnel asistido con infrarrojo.

Calidad de Impresión

En el Cuadro 7, se muestra la comparación de las fotografías de las muestras impresas en 3D respecto al modelo digital, las cuales demostraron una alta precisión de impresión, ya que, la apariencia general y la estructura de las muestras impresas, coincidieron en su mayoría con la estructura del diseño.

La calidad de las impresiones se calificaron del 1 al 5 (1 = muy mala y 5 = muy buena) según un sistema de puntuación de impresiones de alimentos 3D propuesto por Yuntao Liu et al. (2020). En el Anexo L se muestra los resultados del análisis de medidas repetidas en el tiempo, donde se encontró interacción en tratamiento-tiempo (P < 0.0001), por lo tanto, se discutieron los resultados por separado 0 y 2 horas.

Los análisis de calidad de impresión inmediatamente después de la impresión (0 h) indicaron que el factor más determinante fue la adición (P=0.0270), seguido por el proceso de secado (P=0.0410). Las tintas alimentarias LC2, LE3, LC5 e IC13 obtuvieron un puntaje más alto con diferencias significativas de las demás muestras (P < 0.05). Se observó que estás tintas se vieron influenciadas positivamente por la adición de cochayuyo en su formulación, debido a que estos tratamientos, al contener esta macroalga, son fuente de alginato, el cual tiene una capacidad gelificante y

compatibilidad con más ingredientes. Esto lo convierte en un ingrediente adecuado para tintas alimentarias 3D. Para una utilización exitosa, el cochayuyo debe combinarse con otros polímeros como gelatina, almidón o derivados de celulosa (Thakur et al., 2023). Asimismo, a LE3 se les incorporó espirulina, que además de tener todos los aminoácidos esenciales, vitaminas, minerales, pigmentos, antioxidantes, ácidos grasos, tienen buenas propiedades funcionales, incluidas espumantes, emulsionantes y gelificantes, las cuales pueden usarse como ingredientes ideales para tintas alimenticias (Guo et al., 2024).

Sin embargo, tras dos horas a temperatura ambiente, la calidad de impresión de las estructuras se vio influenciada por todos los factores e interacción de estos ($P < .0001$), lo que impide identificar un factor predominante en este caso. A pesar de ello, las muestras LE3 e IC13 mantuvieron una calidad de impresión significativamente superior ($P<0.05$) en comparación con las demás formulaciones.

Cuadro 7

Visualización de imágenes y medidas de precisión para la evaluación de la calidad de impresión de tintas alimentarias a base camote con adiciones de cochayuyo o espirulina.

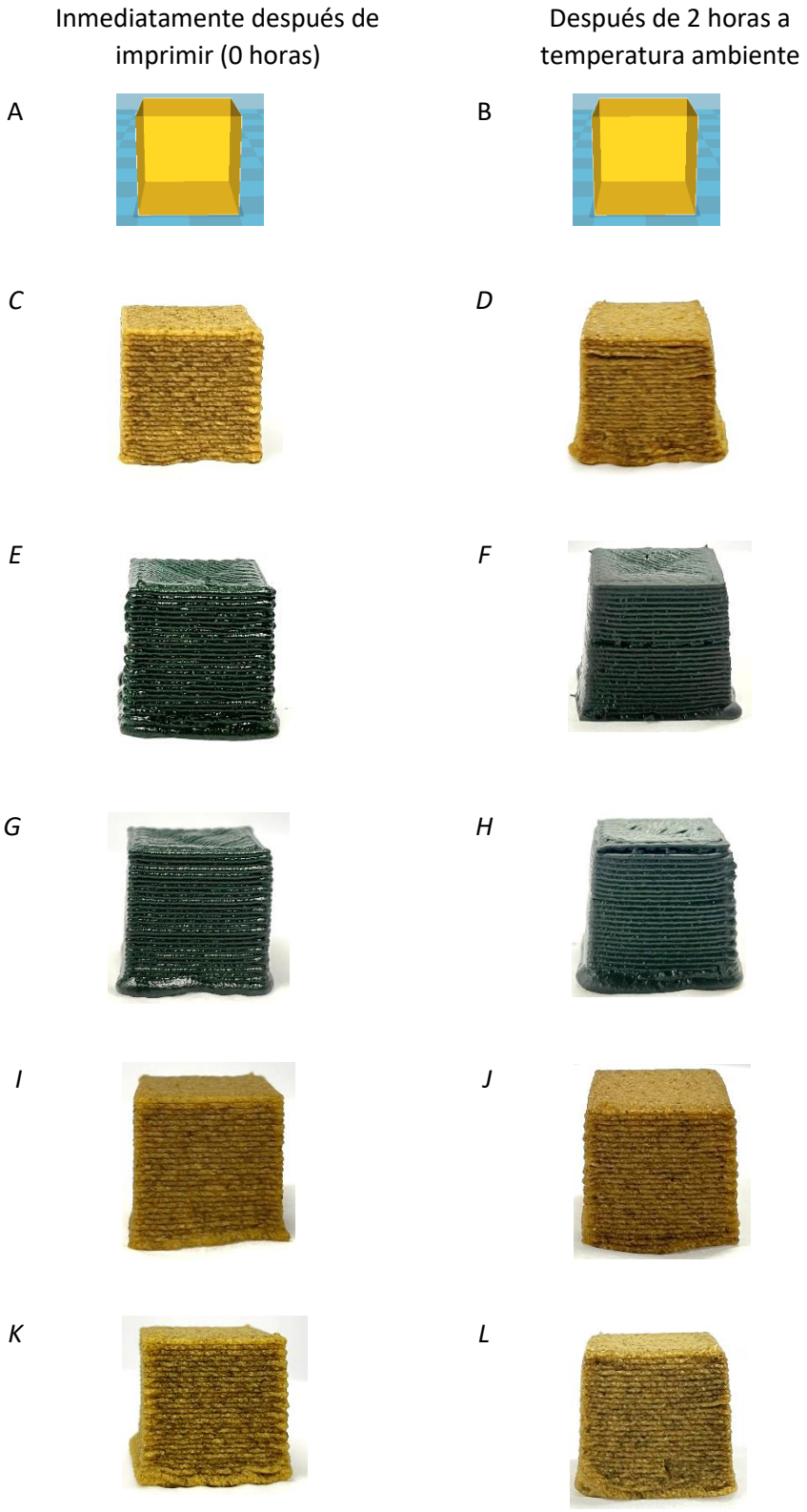
Factores			Muestra	Inmediatamente después de imprimir (0 horas)		Después de 2 horas a temperatura ambiente	
Secado	Adición	Tamaño de partícula (mm)		Calidad de impresión	Observación	Calidad de impresión	Observación
			Modelo Virtual	5 ± 00	Perfecta	5 ± 00	Perfecta (ver Figura 5 A-B).
LF	Cochayuyo	0.355	LC2	5 ± 0.00 [a]	Estructura firme, con pequeñas irregularidades en parte inferior.	3 ± 0.40 [d]	Capas van cayendo, pero mantiene estructura (ver Figura 5 C-D).
LF	Espirulina	0.5	LE3	5 ± 0.00 [a]	Buena forma y estructura firme	5 ± 0.00 [a]	Mínima variación de forma (ver Figura 5 E-F).
LF	Espirulina	0.355	LE4	3 ± 1.50 [c]	Buena forma, pero se observan líneas descontinuas en parte inferior.	3 ± 1.10 [d]	Variación en capas inferiores, van colapsando (ver Figura 5 G-H).
LF	Cochayuyo	0.5	LC5	5 ± 0.00 [a]	Buena forma y estructura firme.	4.73 ± 0.09 [b]	Variación mínima en su forma (ver Figura 5 I-J).
HC	Cochayuyo	0.355	CC6	4 ± 1.00 [b]	Buena forma, pero capas inferiores irregulares.	4 ± 1.40 [c]	Mantiene su forma, con variación mínima en capas inferiores (ver Figura 5 K-L).

Factores			Muestra	Inmediatamente después de imprimir (0 horas)		Después de 2 horas a temperatura ambiente	
Secado	Adición	Tamaño de partícula (mm)		Calidad de impresión	Observación	Calidad de impresión	Observación
HC	Espirulina	0.5	CE7	4 ± 0.90 [b]	Buena estructura, pero irregularidad en capas inferiores.	3 ± 2.80 [d]	Perdida de tamaño, capas inferiores colapsan (ver Figura 5 M-N).
HC	Espirulina	0.355	CE8	2 ± 2.80 [d]	Estructura y forma inestable.	2 ± 2.14 [e]	Variación mínima, se mantiene inestable (ver Figura 5 O-P).
HC	Cochayuyo	0.5	CC9	4 ± 0.50 [b]	Buena estructura y forma, pero con irregularidades en capas inferiores.	4 ± 1.29 [c]	Mínima variación en irregularidades (ver Figura 5 Q-R).
HC-IR	Cochayuyo	0.355	IC10	4 ± 0.99 [b]	Buena estructura, pero con irregularidades en capas inferiores.	2 ± 1.12 [e]	Capas superiores inician a colapsar (ver Figura 5 S-T).
HC-IR	Espirulina	0.5	IE11	4 ± 1.00 [b]	Buena forma, pero estructura inestable.	3 ± 0.99 [c]	Estructura inferior comienza a colapsar (ver Figura 5 U-V).
HC-IR	Espirulina	0.355	IE12	4 ± 1.20 [b]	Buena forma, pero estructura inestable.	4 ± 1.00 [c]	Variación mínima en su forma (ver Figura 5 W-X).
HC-IR	Cochayuyo	0.5	IC13	5 ± 0.00 [a]	Buena forma y estructura firme.	5 ± 0.00 [a]	Variación mínima en su forma (ver Figura 5 Y-Z).
C.V (%)				4.20		5.91	

Nota. Valor medio ± desviación estándar, a-e: Letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas (P < 0.05). C.V: Coeficiente de variación. LF: Liofilizador; HC: Horno convectivo; HC-IR: Horno túnel asistido con infrarrojo.

Figura 5

Visualización de imágenes para la evaluación de la calidad de impresión de tintas alimentarias a base camote con adiciones de cochayuyo o espirulina.



M

N

O

P

Q

R

S

T

U

V

W

X

Y

Z

Nota. A-B: Modelo virtual; C-D: Muestra LC2; E-F: Muestra LE3; G-H: Muestra LE4; I-J: Muestra LC5; K-L: Muestra CC6; M-N: Muestra CE7; O-P: Muestra CE8; Q-R: Muestra: CC9; S-T: Muestra IC10; U-V: Muestra IE11; W-X: Muestra IE12; Y-Z: Muestra IC13.

El Cuadro 8 presenta las fotografías de las figuras impresas en 3D y la calidad de impresión evaluada a las 0 y 2 horas, utilizando tintas alimentarias elaboradas a base de harina de camote obtenida por LF, HC y HC-IR con un tamaño de partícula de 0.5 mm y combinación de adición de cochayuyo y espirulina. A las 0 horas, los cubos recién impresos no mostraron diferencias significativas ($P > 0.05$). Sin embargo, después de 2 horas a temperatura ambiente, la tinta LCE14 mostró la mayor calidad en la impresión con diferencias significativas ($P < 0.05$) respecto a las demás muestras, manteniendo la calidad de impresión inicial.

Esto puede deberse a la estabilidad reológica y estructural de la tinta LCE14, que mantuvo su forma y calidad de impresión incluso después de 2 horas a temperatura ambiente. Este comportamiento puede estar relacionado con la capacidad de la espirulina y el cochayuyo para retener agua y formar una estructura de gel estable, lo que previene la deformación con el paso del tiempo. Zheng et al. (2019) demostraron que las propiedades de gelificación y retención de agua de ciertos ingredientes pueden mejorar la estabilidad de las estructuras impresas en 3D, incluso bajo condiciones ambientales.

Cuadro 8

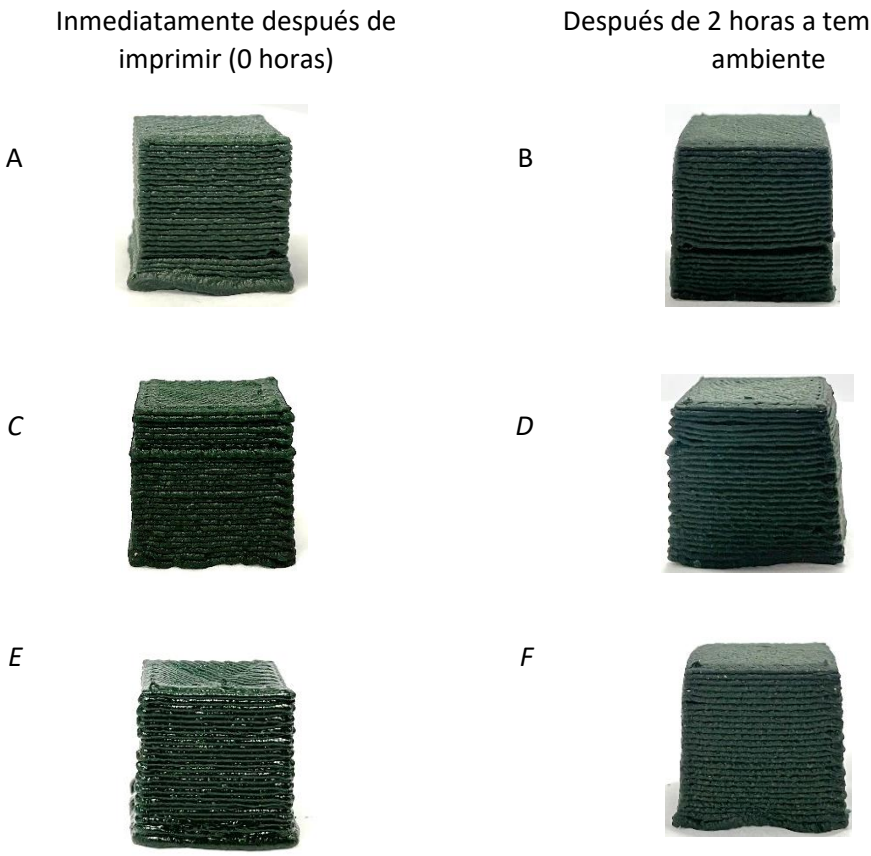
Visualización de imágenes y medidas de precisión para la evaluación de la calidad de impresión de tinta de camote con mezcla de adición de cochayuyo y espirulina.

Factores				Inmediatamente después de imprimir (0 horas)		Después de 2 horas a temperatura ambiente	
Secado	Adición	Tamaño de partícula (mm)	Muestra	Calidad de impresión	Observación	Calidad de impresión	Observación
LF	Cochayuyo + espirulina	0.5	LCE14	5 ± 00 [a]	Buena forma y estructura firme.	5 ± 00 [a]	Variación mínima en su forma (ver Figura 6 A-B).
HC	Cochayuyo + espirulina	0.5	CCE15	5 ± 0.99 [a]	Buena forma y estructura.	4 ± 1.10 [b]	Variación en capas, inician a colapsar (ver Figura 6 C-D).
HC-IR	Cochayuyo + espirulina	0.5	ICE16	5 ± 1.10 [a]	Buena forma y estructura.	4 ± 0.99 [b]	Reducción de tamaño en parte superior (ver Figura 6 E-F).
C.V (%)				0.85		0.75	

Nota. Valor medio ± desviación estándar, a-b: Letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas (P < 0.05). C.V: Coeficiente de variación. LF: Liofilizador; HC: Horno convectivo; HC-IR: Horno túnel asistido con infrarrojo.

Figura 6

Visualización de imágenes para la evaluación de la calidad de impresión de tinta de camote con mezcla de adición de cochayuyo y espirulina.



Nota. A-B: Muestra LCE14; C-D: Muestra CCE15; E-F: Muestra ICE16

Tasa de Deformación

En cuanto a las impresiones luego de dos horas de haber sido impresas y dejadas a temperatura ambiente, en el Cuadro 9 se muestra la tasa de deformación la cual fue dividida en secciones: altura (h); profundidad inferior (Pi), profundidad superior (Ps); ancho inferior (Ai), ancho superior (As) y respecto a la deformación global.

La deformación en altura de los cubos impresos en 3D fue afectada principalmente por la interacción entre los factores de secado, adición y granulometría (P=0.0004), lo que dificulta determinar un único factor predominante en este caso. No obstante, se identificaron diferencias

significativas (P<0.05) entre, la formulación LE4 mostrando la mayor tasa de deformación en altura con el resto de las muestras.

Respecto a la deformación en la profundidad inferior, la granulometría resultó ser el factor más determinante (P=0.0448), la tinta alimentaria CE8 presentó una mayor deformación que CC9 con diferencias significativas (P < 0.05). Para la profundidad superior, la granulometría nuevamente fue el factor principal (P=0.0002), seguido del secado (P=0.0578), destacándose IE12 con la mayor deformación con diferencias significativas (P < 0.05) que las muestras LC5, CE7, CE8, CC9, IE11 e IC13.

En cuanto a la deformación del ancho inferior tanto los factores como la interacción de estos no fueron influyentes (P > 0.05), pero LC2 presentó una mayor deformación que las tintas IC10 e IC13 con diferencias estadísticamente significativas (P < 0.05). En cuanto al ancho superior, la granulometría volvió a ser el factor más influyente (P=0.0007), seguido del secado (P=0.0171). La muestra LE4 mostró más deformación que las tintas LC2, LE3, LC5, CC6, CE7, CE8, CC9, IC10, IE11 e IC13 con diferencias estadísticamente significativas (P < 0.05). Para la deformación global, no se observaron influencias significativas de los factores analizados (P > 0.05), pero LE4 mostró diferencias estadísticamente significativas (P < 0.05) de las demás muestras, excepto de IC10 e IE12, siendo las mencionadas las que presentaron una mayor tasa de deformación. Al contario, las demás tintas, se pudo haber obtenido una menor tasa de deformación debido a las formulaciones específicas de cada muestra, según investigaciones realizadas por Dankar et al. (2018), este tipo de mezclas permite obtener estructuras con la integridad mecánica suficiente para soportar la geometría luego de ser impresa.

En todas las tintas se observó deformación en las estructuras (Cuadro 9), y en la fidelidad de profundidad inferior CE8, superior IE12 y ancho superior LE4 el factor granulometría fue el más influyente, estás muestras contenían un tamaño de partícula de 0.355 mm, esto se compara con los resultados obtenidos por Mantihal et al. (2017) donde en su investigación, las impresiones 3D que tenían partículas <0.5 mm no obtuvieron una buena estabilidad estructural, en cambio, con el tamaño de partícula 0.5 mm mantuvieron la retención de la forma y una mejor estructura.

En la profundidad y el ancho, se observó que disminuían considerablemente de la parte inferior a la superior, debido al aumento del peso en las capas inferiores, causado por la impresión de capas superpuestas, lo que conlleva a aplastar las capas inferiores. De manera similar, Lee et al. (2019) notaron que las muestras estaban considerablemente deformadas y eran más grandes cuando se acercaban a la parte inferior de las muestras. Además, el aplastamiento de las capas en el inferior de las muestras reduce la altura, induciendo así el desequilibrio entre la altura real de la capa y los valores establecidos. De igual forma, en comparación a las demás características, en las observaciones del Cuadro 7, las tintas que contenían harina de camote HC mostraron variaciones en su forma, inestabilidad de estructura, perdida de tamaño y colapso de capas inferiores. Esto pudo haber sucedido porque se vieron afectadas en gran medida las características de las impresiones en 3D, pues se ha informado que el HC afecta significativamente las propiedades nutricionales y funcionales relacionadas con el almidón (Restrepo Román et al., 2023)

Cuadro 9

Tasa de deformación de cubos impresos 3D con tintas alimentarias a base de camote con adiciones de cochayuyo o espirulina después de 2 horas a temperatura ambiente.

Factores									
Secado	Adición	Granulometría (mm)	Muestra	Deformación altura (%)	Deformación profundidad Inferior (%)	Deformación profundidad superior (%)	Deformación ancho inferior (%)	Deformación ancho superior (%)	Deformación global (%)
LF	Cochayuyo	0.355	LC2	0.83 ± 1.04 ^{b}	2.67 ± 3.84 ^{ab}	4.63 ± 1.26 ^{abc}	4.87 ± 3.21 ^{a}	4.97 ± 2.16 ^{abc}	3.37 ± 2.49 ^{bcd}
LF	Espirulina	0.5	LE3	0.82 ± 0.75 ^{b}	1.28 ± 1.21 ^{ab}	3.83 ± 0.58 ^{abc}	1.94 ± 1.79 ^{ab}	5.43 ± 0.79 ^{ab}	2.82 ± 1.35 ^{cd}
LF	Espirulina	0.355	LE4	5.96 ± 1.29 ^{a}	2.57 ± 1.61 ^{ab}	6.17 ± 1.04 ^{ab}	2.01 ± 2.25 ^{ab}	7.00 ± 0.00 ^{a}	6.10 ± 1.30 ^{a}
LF	Cochayuyo	0.5	LC5	0.83 ± 0.76 ^{b}	1.66 ± 0.77 ^{ab}	2.67 ± 1.15 ^{c}	3.64 ± 1.23 ^{ab}	3.50 ± 1.32 ^{bcd}	2.05 ± 1.07 ^{d}
HC	Cochayuyo	0.355	CC6	2.13 ± 2.43 ^{b}	2.73 ± 0.44 ^{ab}	3.81 ± 1.58 ^{abc}	3.89 ± 1.89 ^{ab}	3.96 ± 2.24 ^{bcd}	3.25 ± 1.98 ^{bcd}
HC	Espirulina	0.5	CE7	2.26 ± 1.46 ^{b}	1.47 ± 0.24 ^{ab}	2.66 ± 2.02 ^{c}	2.92 ± 1.80 ^{ab}	4.00 ± 1.80 ^{bcd}	2.52 ± 1.64 ^{cd}
HC	Espirulina	0.355	CE8	0.50 ± 0.00 ^{b}	3.41 ± 3.06 ^{a}	3.47 ± 2.24 ^{bc}	2.44 ± 2.06 ^{ab}	3.67 ± 0.76 ^{bcd}	2.48 ± 1.41 ^{cd}
HC	Cochayuyo	0.5	CC9	0.98 ± 0.98 ^{b}	0.17 ± 0.29 ^{b}	2.77 ± 2.50 ^{c}	1.61 ± 1.39 ^{ab}	2.31 ± 2.01 ^{cd}	2.17 ± 1.22 ^{d}
HC-IR	Cochayuyo	0.355	IC10	0.66 ± 0.75 ^{b}	0.48 ± 0.50 ^{ab}	6.27 ± 1.47 ^{ab}	0.32 ± 0.28 ^{b}	5.78 ± 0.27 ^{ab}	4.41 ± 0.39 ^{abc}
HC-IR	Espirulina	0.5	IE11	1.98 ± 0.47 ^{b}	0.78 ± 0.71 ^{ab}	3.00 ± 1.00 ^{c}	1.40 ± 0.47 ^{ab}	2.33 ± 0.29 ^{cd}	2.66 ± 0.47 ^{cd}
HC-IR	Espirulina	0.355	IE12	1.98 ± 0.86 ^{b}	1.52 ± 2.25 ^{ab}	6.60 ± 0.98 ^{a}	2.48 ± 0.70 ^{ab}	5.50 ± 1.32 ^{ab}	5.05 ± 0.51 ^{ab}
HC-IR	Cochayuyo	0.5	IC13	1.00 ± 0.87 ^{b}	1.45 ± 1.66 ^{ab}	2.83 ± 0.76 ^{c}	1.29 ± 1.82 ^{b}	2.17 ± 0.76 ^{d}	2.22 ± 1.07 ^{cd}
C.V(%)				15.07	28.21	37.12	18.32	33.21	28.23

Nota. Valor medio ± desviación estándar, a-d: Letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas (P < 0.05). C.V: Coeficiente de variación. LF: Liofilizador; HC: Horno convectivo; HC-IR: Horno túnel asistido con infrarrojo.

El Cuadro 10 detalla la tasa de deformación de las estructuras impresas en 3D utilizando tintas alimentarias que combinan la adición de cochayuyo y espirulina con harina de camote de un tamaño de partícula de 0.5 mm. Respecto al porcentaje de deformación en altura, la tinta CCE15 mostró una deformación significativamente mayor en comparación con ICE16 (P < 0.05). Asimismo, tanto en la profundidad inferior como en la deformación global, CCE15

presentó valores significativamente superiores a los de LCE14 e ICE16 ($P < 0.05$). En cuanto a la deformación de la profundidad superior, el ancho inferior y el ancho superior, no se observaron diferencias significativas ($P > 0.05$).

Estos resultados pueden ser explicados por el método de secado de CCE15, que se compara con una investigación sobre secado de yacón donde Marques et al. (2022) mencionan que el secado convectivo daña las propiedades físicas de los alimentos debido a la alta velocidad de transferencia de calor y la pérdida rápida de agua, lo que provoca contracción y endurecimiento en productos como frutas y vegetales. Estas condiciones generan un colapso celular que afecta la textura y la apariencia del alimento.

Cuadro 10

Tasa de deformación de cubos impresos 3D con tintas alimentarias a base de camote con mezcla de adición de cochayuyo y espirulina después de 2 horas a temperatura ambiente.

Factores									
Secado	Adición	Granulometría (mm)	Muestra	Deformación altura (%)	Deformación profundidad Inferior (%)	Deformación profundidad superior (%)	Deformación ancho inferior (%)	Deformación ancho superior (%)	Deformación global (%)
LF	Cochayuyo + espirulina	0.5	LCE14	2.99 ± 2.64 [ab]	0.32 ± 0.55 [b]	4.33 ± 0.58 [a]	2.73 ± 3.18 [a]	5.33 ± 1.15 [a]	3.88 ± 1.27 [b]
HC	Cochayuyo + espirulina	0.5	CCE15	3.96 ± 1.53 [a]	7.08 ± 1.98 [a]	6.53 ± 3.00 [a]	2.94 ± 0.48 [a]	6.84 ± 1.26 [a]	5.67 ± 0.47 [a]
HC-IR	Cochayuyo + espirulina	0.5	ICE16	0.17 ± 0.29 [b]	1.37 ± 1.62 [b]	5.16 ± 1.27 [a]	1.99 ± 1.01 [a]	5.17 ± 0.29 [a]	3.49 ± 0.74 [b]
C.V(%)				5.45	6.32	3.67	2.59	5.34	3.89

Nota. Valor medio ± desviación estándar, a-b: Letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas ($P < 0.05$). C.V: Coeficiente de variación. LF: Liofilizador; HC: Horno convectivo; HC-IR: Horno túnel asistido con infrarrojo.

Elección de Mejores Tintas Alimentarias

Para la elección de las mejores 3 tintas alimentarias, a las cuales se les realizaron los análisis físicos y químicos de las muestras impresas 3D, solo se eligieron las tintas con mejor rendimiento. Se siguió la metodología propuesta por (M. Wang et al., 2023) donde se consideran aquellas que podían pasar a través de la boquilla y mostraban una estabilidad de forma razonable después de la extrusión. De igual manera, se tomó en cuenta la calidad de la impresión a las 0 y 2 horas, la fidelidad y el aspecto visual, eligiendo a LE3, IC13 e IC14 como tratamientos finales (Cuadro 11).

Cuadro 11

Tintas alimentarias seleccionadas para pasar a la Fase 2.

Factores			
Secado	Adición	Granulometría (mm)	Muestra
HC-IR	Cochayuyo	0.5	IC13
LF	Espirulina	0.5	LE3
LF	Cochayuyo + espirulina	0.5	LCE14

Nota. HC-IR: Horno túnel asistido con infrarrojo, LF: Liofilizador.

Reología

En los Anexos M, N y 0 se muestran los datos de los resultados de los análisis de viscosidad aparente, curva de flujo, módulo de almacenamiento (G’), módulo de pérdida (G”) y tangente de pérdida (tan δ) de las pastas.

Viscosidad Aparente

Según Yaowei Liu et al. (2018), las propiedades reológicas de los materiales alimenticios están ampliamente relacionadas con la capacidad de impresión 3D de alimentos. Durante la impresión, la viscosidad y el comportamiento del flujo de los materiales alimenticios están ampliamente relacionados con la capacidad de impresión 3D de alimentos. Durante la impresión, la viscosidad, el comportamiento del flujo y la capacidad de los materiales para mantener su forma son fundamentales para una impresión exitosa.

Se demostró que la viscosidad aparente de las tintas alimentarias a base de harina de camote con adición de cochayuyo y/o espirulina se ajustó en gran medida a los modelos clásicos de Ostwald-

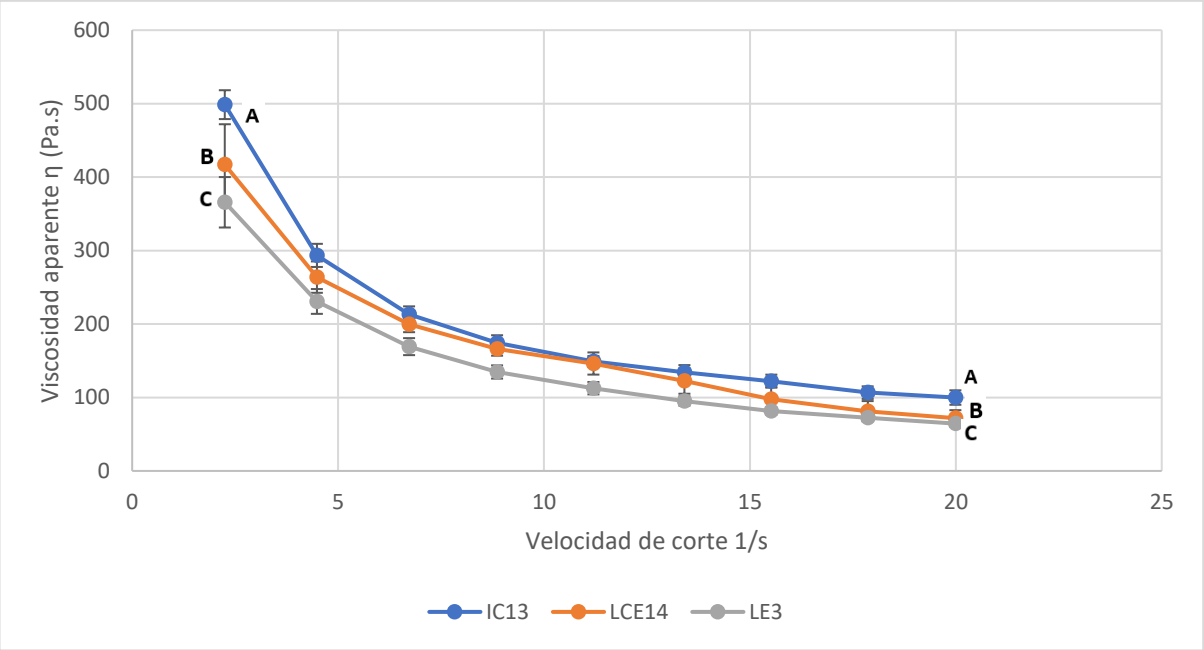
de-Waele, lo que indicó una característica pseudoplástica (Yin et al., 2024). En la Figura 7, todas las tintas alimentarias mostraron un comportamiento pseudoplástico, siendo IC13 significativamente diferente de LE3 y LCE14 ($P < 0.05$), asociado con una viscosidad aparente que disminuyó gradualmente con el aumento de la velocidad de corte. Esto permitió un proceso de extrusión fácil a partir de una boquilla de 0.8 mm. Asimismo, la viscosidad y la resistencia mecánica debían recuperarse rápidamente una vez que se eliminará la fuerza de corte para poder autosostenerse.

El comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento de los materiales es muy deseable en la impresión 3D por extrusión, ya que los materiales con dicho comportamiento se extruyen fácilmente a una tasa alta de cizallamiento durante la impresión 3D y mantiene la estructura después de la deposición (Cui et al., 2022). Por lo tanto, las tintas se comportaron como fluidos no newtonianos, lo que es fundamental para lograr una buena impresión 3D.

La viscosidad aparente de las tintas alimentarias (Figura 7) aumentó con mayor contenido de cochayuyo, principalmente a bajas tasas de cizallamiento, siendo más pronunciado en IC13. Esto se debe al alginato presente en el cochayuyo, que forma enlaces de hidrógeno con las moléculas de agua, dando como resultado una red más densa. Estos hallazgos son consistentes con la investigación previa realizada por Rysenaer et al. (2020), quienes descubrieron que al aumentar la concentración de alginato de sodio se obtenía una mayor viscosidad aparente.

Figura 7

Viscosidad aparente de las tintas de impresión 3D.



Nota. a-c: Letras diferentes representan diferencias significativas (P < 0.05). IC13: Harina de camote obtenida en horno túnel asistido con infrarrojo con adición de cochayuyo; LCE14: Harina de camote obtenida en liofilizador con adición de cochayuyo y espirulina; LE3: Harina de camote obtenida en liofilizador con adición de espirulina.

Curvas de Flujo

Las curvas obtenidas de esfuerzo cortante y la velocidad de corte de las distintas tintas alimentarias (Figura 8) se ajustaron a distintos modelos de flujo no newtonianos, en el Cuadro 12 se muestran los valores R^2 obtenidos para los modelos reológicos Herschel Buckley, Power law (lin) y Ostwald de Waele. De los tres modelos el que mejor se ajustó a todas las tintas alimentarias fue Ostwald de Waele con un R^2 de 0.99, 099 y 0.98 para IC13, LCE14 y LE3 respectivamente.

El modelo de Ostwald-de Waele, es el modelo matemático más utilizado para describir el comportamiento de fluidos pseudoplásticos. Los parámetros ajustados K y los valores n se utilizaron para reflejar el comportamiento del flujo. La Ecuación 6 muestra la fórmula del modelo:

$$\tau = K\dot{y}^n \qquad [6]$$

En donde:

τ = indica el esfuerzo cortante.

K = indica la consistencia del fluido

$\dot{y}$ = indica la velocidad de deformación

n = indica el índice de comportamiento del fluido

Las curvas de flujo se ajustaron al modelo reológico Ostwald-de Waele ($\tau = K\dot{y}^n$), que se muestra en la Figura 8. Los valores de los parámetros K y n se informan en el Cuadro 13, estos se utilizaron para reflejar el comportamiento del flujo de las tintas alimentarias.

Las diferentes viscosidades de las tintas alimentarias pueden explicarse por el valor K, IC13 presentó diferencias significativas de las demás tintas ($P < 0.05$), siendo la tinta con una mayor capacidad de extrusión, esto pudo ser causado por la adición del cochayuyo, que promovió mejoras debido a que esta alga es rica en polisacáridos como alginato, el cual funciona como gelificante (Abka-Khajouei et al., 2022). La composición de las tintas formaron una red tridimensional a través de enlaces de hidrogeno (Swe y Asavapichayont, 2018). Cuando se aplica una alta tasa de corte, las redes se destruyen rápidamente y exhiben una baja viscosidad (Tian et al., 2021). En la etapa de la extrusión de la impresión 3D, un alto valor K dio como resultado un comportamiento similar al de un sólido después de la extrusión. Está tinta alimentaria al haber podido extruirse fácilmente desde la boquilla y ser autoportante gracias al alto valor K y bajo valor n, se relaciona con lo mencionado por Bollom et al. (2020), donde mencionaron que formular una tinta con valores K y n adecuados garantiza que el material pueda mantener la estabilidad de la forma después de la extrusión.

Los valores n de todas las tintas alimentarias fueron < 1, no obstante, la adición de cochayuyo y espirulina en LCE14 mostró un valor mayor significativamente mayor que las demás tintas ($P < 0.05$). Aunque se encuentra dentro del rango pseudoplástico (< 1) fue la tinta con un valor más alto, lo cual sugiere que la tinta no se adelgaza tan rápidamente bajo el esfuerzo de corte en comparación con las otras tintas alimentarias (Qiu et al., 2022).

Cuadro 12

Valores de R^2 de los distintos modelos reológicos comparados.

Factores				R^2		
Secado	Adición	Granulometría (mm)	Muestra	Ostwald de Waele	Herschel Buckley	Power law (lin)
HC-IR	Cochayuyo	0.5	IC13	0.99	0.94	0.97
LF	Espirulina	0.5	LE3	0.98	0.77	0.95
LF	Cochayuyo + espirulina	0.5	LCE14	0.99	0.78	0.94

Nota. Valor medio ± desviación estándar. LF: Liofilizador; HC: Horno convectivo; HC-IR: Horno túnel asistido con infrarrojo; K: Consistencia del fluido; n: Comportamiento del fluido.

Cuadro 13

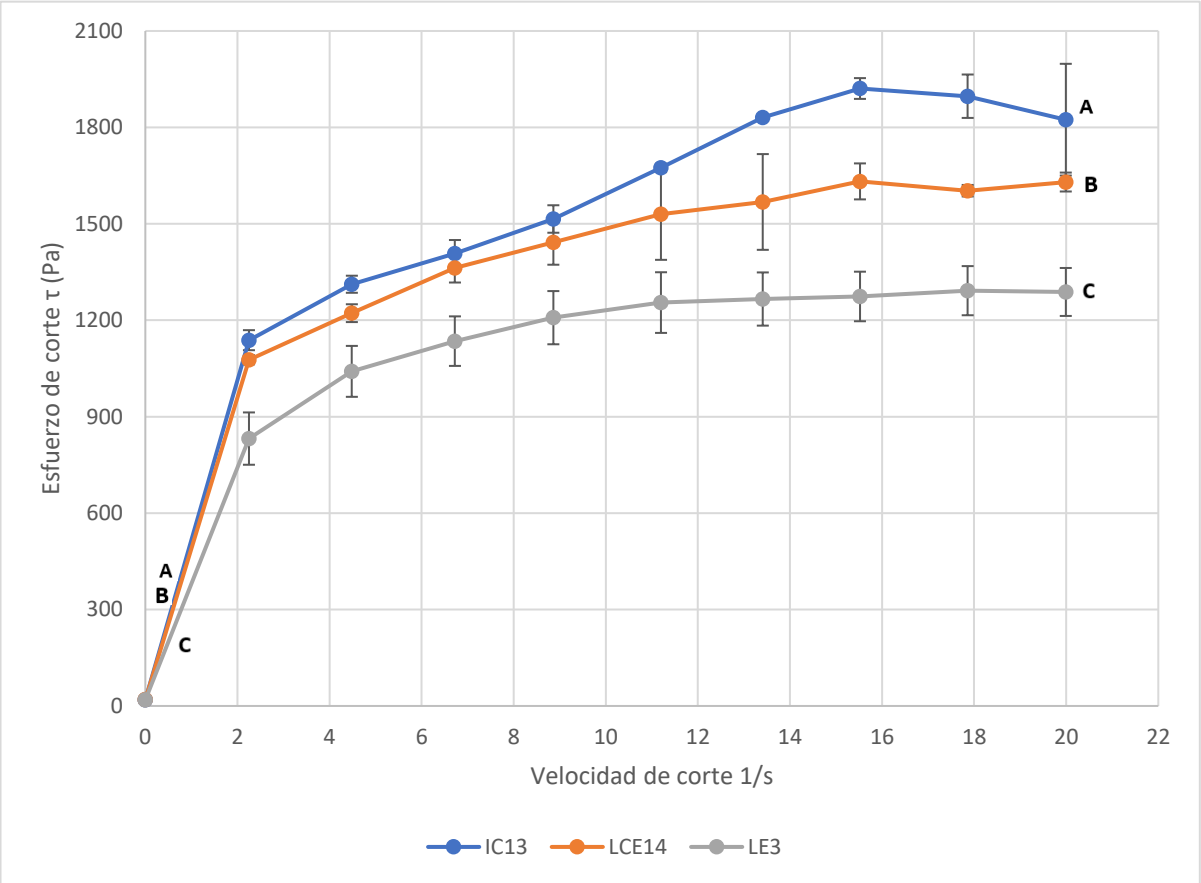
Parámetros reológicos del modelo Ostwald de Waele de las tintas impresas 3D.

Factores						
Secado	Adición	Granulometría (mm)	Muestra	K (Pa s^n)	n	R^2
HC-IR	Cochayuyo	0.5	IC13	907.53 ± 56.70 [a]	0.22 ± 0.04 [b]	0.98
LF	Espirulina	0.5	LE3	527.90 ± 66.25 [b]	0.23 ± 0.01 [b]	0.97
LF	Cochayuyo + espirulina	0.5	LCE14	673.26 ± 60.23 [b]	0.39 ± 0.09 [a]	0.96

Nota. LF: Liofilizador; HC: Horno convectivo; HC-IR: Horno túnel asistido con infrarrojo; K: Consistencia del fluido; n: Comportamiento del fluido. a-b: *L*etras diferentes representan diferencias significativas ($P < 0.05$).

Figura 8

Curva de flujo de las tintas de impresión 3D.



Nota. a-c: Letras diferentes representan diferencias significativas (P < 0.05). IC13: Harina de camote obtenida en horno túnel asistido con infrarrojo con adición de cochayuyo; LCE14: Harina de camote obtenida en liofilizador con adición de cochayuyo y espirulina; LE3: Harina de camote obtenida en liofilizador con adición de espirulina.

Barrido de Frecuencia

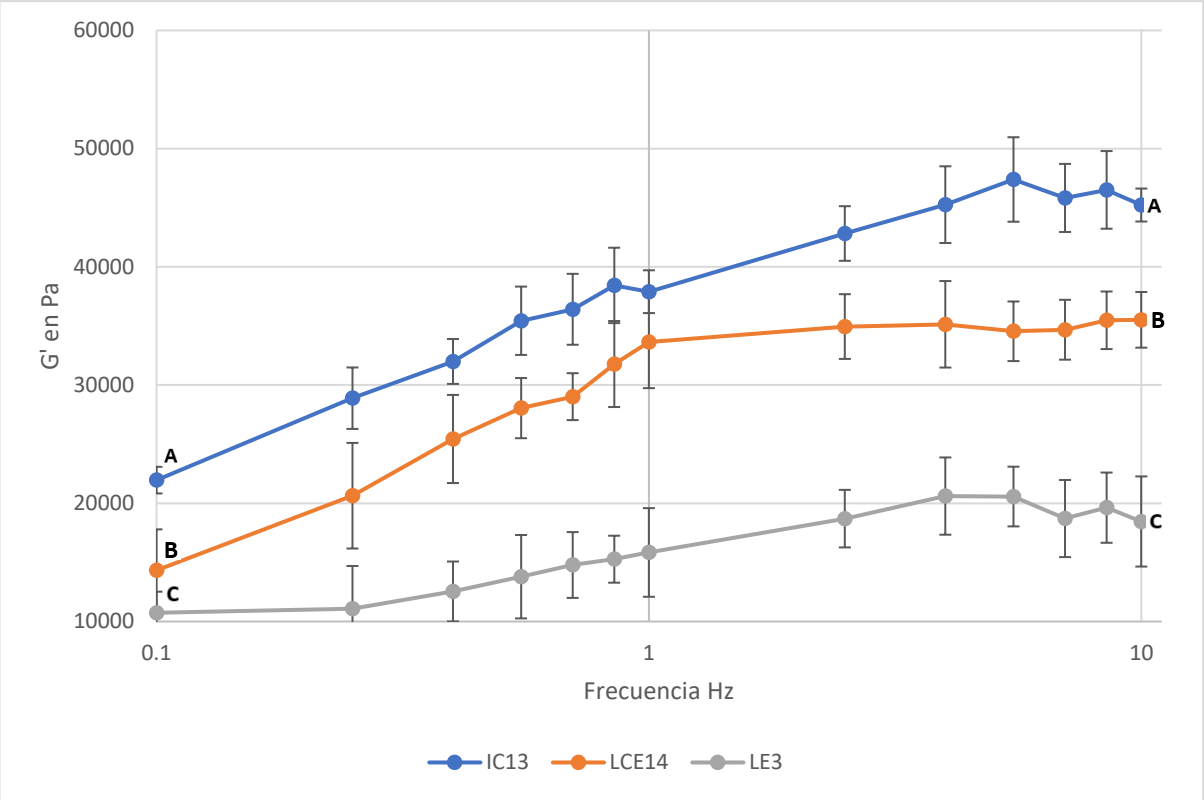
Las Figuras 9 y 10 muestran las propiedades viscoelásticas de las tintas alimentarias; G' (módulo elástico) y G” (módulo viscoso) versus el rango de frecuencia de las tintas alimentarias. El primero está relacionado con la elasticidad del material de prueba similar al de un sólido, es decir, la resistencia de las tintas a deformarse elásticamente, mientras que el segundo se relaciona con su viscosidad y la exhibición de la fluidez (Yin et al., 2024). Tanto G’ como G” incrementaron a medida que aumentaba la frecuencia. Para todas las tintas el valor G' fue mayor que G”, lo que representó comportamientos similares a los de un sólido. Cuando G' es alta, proporciona más resistencia mecánica una vez que se imprime el objeto. Esto significó que la propiedad elástica de la tinta fue más

fuerte que la propiedad viscosa, lo cual contribuyó a mantener la estructura de los objetos impresos (M. Wang et al., 2023).

Esto pudo deberse a que el reordenamiento molecular fue rápido, generando un mayor número de entrelazamientos entre el almidón y el alginato, lo que resultó en un comportamiento más sólido de la muestra, haciendo que prevalezca el G' (Yaowei Liu et al., 2018). Asimismo, los gránulos de almidón absorben agua y se hinchan durante la formación de la tinta, creando una estructura de red más densa (Martínez-Monzó et al., 2019). Las tintas que contenían cochayuyo más cochayuyo (IC13) obtuvo un aumento significativamente mayor en G' que LCE14 y LE3 ($P < 0.05$), lo cual mostró una mayor resistencia estructural, alineándose con los resultados de las pruebas de viscosidad. LE3 mostró el valor G’ más bajo entre todas las tintas, según J. Wang et al. (2024), esto puede deberse a una menor concentración de polisacáridos, que impide que el sistema de tinta forme una estructura de pasta tan estable como las demás.

Figura 9

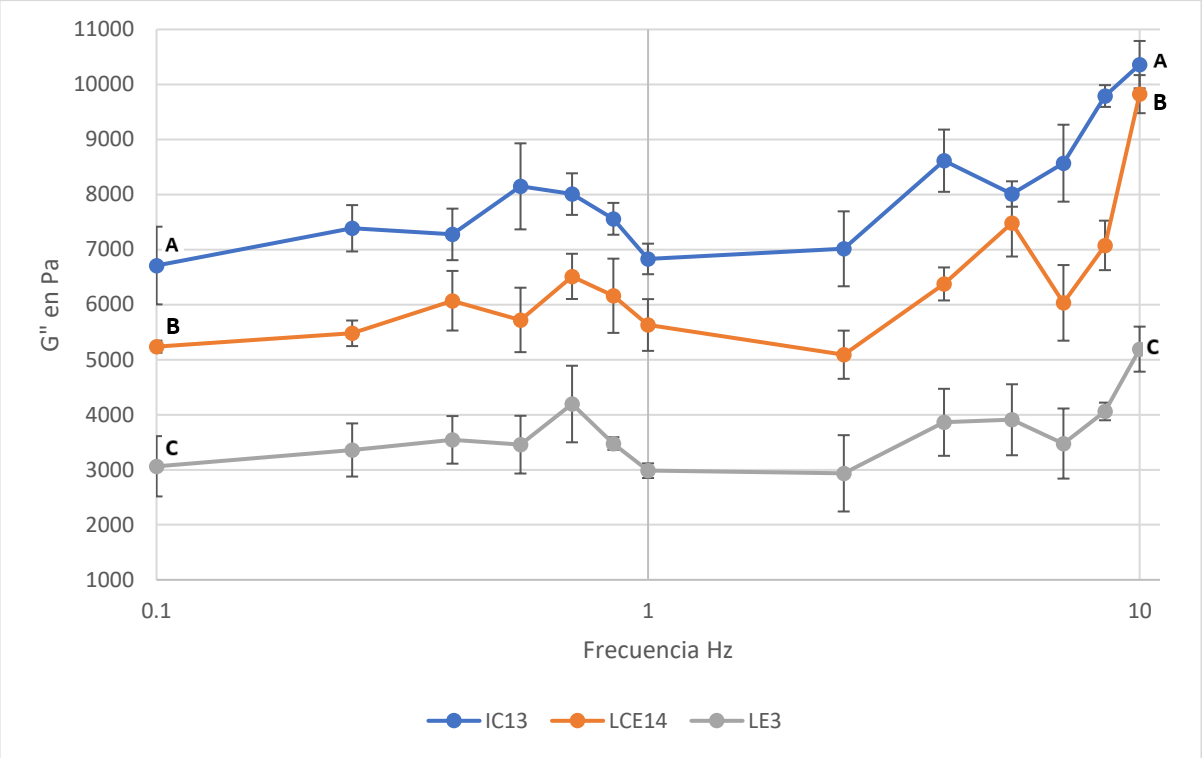
Módulo de almacenamiento (G’).



Nota. a-c: Letras diferentes representan diferencias significativas (P < 0.05). IC13: Harina de camote obtenida en horno túnel asistido con infrarrojo con adición de cochayuyo; LCE14: Harina de camote obtenida en liofilizador con adición de cochayuyo y espirulina; LE3: Harina de camote obtenida en liofilizador con adición de espirulina.

Figura 10

Módulo de pérdida (G”).

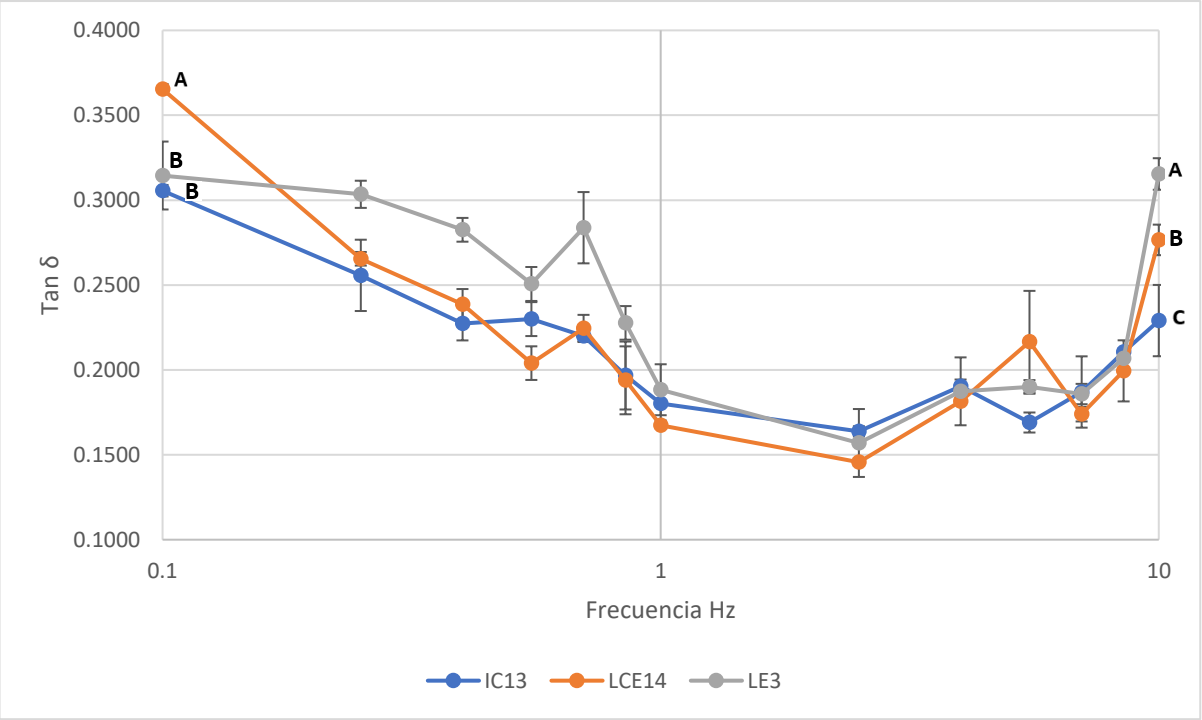


Nota. a-c: Letras diferentes representan diferencias significativas (P < 0.05). IC13: Harina de camote obtenida en horno túnel asistido con infrarrojo con adición de cochayuyo; LCE14: Harina de camote obtenida en liofilizador con adición de cochayuyo y espirulina; LE3: Harina de camote obtenida en liofilizador con adición de espirulina.

En la Figura 11 se observa la tangente de pérdida (tan δ = G”/G’), la cual representa la relación entre la viscosidad y la elasticidad de un material, e indica lo bueno que será un material para absorber energía. Una tan δ < 1 es una propiedad predominantemente elástica que exhibe características sólidas, de modo que el producto impreso pueda mantener la forma deseada durante mucho tiempo; de lo contrario, una tan δ > 1 muestra comportamientos viscosos con características liquidas y una fidelidad de forma deficiente del producto impreso. Todas las tintas alimentarias mostraron una tan δ menor a 1, lo cual, indicó un comportamiento más sólido. A altas frecuencias IC13 mostró una tan δ significativamente menor que LCE14 y LE3 (P < 0.05), esto pudo haberse visto influenciado por la adición de cochayuyo, lo que podría ser el resultado de un mayor enredo entre las moléculas de almidón y/o entre las moléculas de almidón y el alginato (C. He et al., 2020).

Figura 11

Tangente de pérdida (tan δ).



Nota. a-c: Letras diferentes representan diferencias significativas (P < 0.05). IC13: Harina de camote obtenida en horno túnel asistido con infrarrojo con adición de cochayuyo; LCE14: Harina de camote obtenida en liofilizador con adición de cochayuyo y espirulina; LE3: Harina de camote obtenida en liofilizador con adición de espirulina.

Análisis del Perfil de Textura TPA

La prueba TPA determina las propiedades de masticación de los alimentos simulando las sensaciones humanas para predecir la aceptabilidad durante la masticación, comprimiendo la muestra de prueba dos veces (Yang et al., 2019). Los perfiles de textura exhibidos en el Cuadro 14 incluyeron dureza, adhesividad, resiliencia, cohesión, elasticidad, gomosidad y masticabilidad. La dureza se refiere a la fuerza requerida para que un material alimenticio alcance un cierto nivel de deformación. Las tintas alimentarias no presentaron diferencias significativas en la dureza ($P > 0.05$). Respecto a la adhesividad, que se define como el trabajo requerido para superar las fuerzas de atracción entre la superficie del alimento y la superficie de los otros materiales con los que el alimento entra en contacto, LE3 mostró diferencias significativas ($P < 0.05$), lo que indicó que fue la tinta alimentaria más pegajosa. Esto puede atribuirse a la mayor cantidad de componentes hidrofílicos presentes en la espirulina, que aumentan la pegajosidad del material (Letras et al., 2022). Con relación a la resiliencia, que mide la

capacidad del material para recuperar su forma después de ser comprimido, entre LCE14 y LE3 no mostraron diferencias significativas entre sí ($P > 0.05$) mostrando los valores más altos. Esto sugirió que las estructuras flexibles de los biopolímeros en la espirulina y el camote liofilizado contribuyeron a una mayor resiliencia en estas muestras (Madadi et al., 2021). En cambio, IC13 mostro diferencias significativas ($P < 0.05$) con el valor más bajo, esto se compara con una investigación realizada por Lemus-Mondaca et al. (2024) donde reportaron que las muestras con cochayuyo presentaban una menor resiliencia y adhesividad. En cuanto a la cohesión, que indica la capacidad del material en que el producto se recupera de la deformación antes de romperse, no se encontraron diferencias significativas ($P > 0.05$). Sobre la elasticidad, que representa la capacidad de la muestra para volver a su forma original después de la deformación, LE3 presentó diferencias significativas ($P < 0.05$) del resto de las muestras. Según Feng et al. (2023), en su investigación sobre formación de geles, los que contenían espirulina exhibieron una mayor elasticidad, lo que condujo a una mejor extrusión y buena resolución estructural. Para parámetros de gomosidad y la masticabilidad que reflejan la energía necesaria para desintegrar el alimento durante la masticación hasta que se pueda tragar, LE3 presentó diferencias significativas ($P < 0.05$) con respecto a IC13. Según Zhang et al. (2022), la espirulina incrementa el valor de gomosidad y masticabilidad, este incremento puede atribuirse a la capacidad de la espirulina para interactuar con otros componentes, como el almidón del camote y retener agua, formando una red más firme.

Cuadro 14

Parámetros de textura de las tintas impresas en 3D.

Factores										
Secado	Adición	Granulometría (mm)	Muestra	Dureza (N)	Adhesividad (N/mm2)	Resiliencia (%)	Cohesión	Elasticidad (%)	Gomosidad	Masticabilidad
HC-IR	Cochayuyo	0.5	IC13	3.80 ± 0.79 [a]	-0.05 ± 0.03 [a]	4.03 ± 0.06 [b]	0.13 ± 0.00 [a]	19.63 ± 0.76 [b]	0.52 ± 0.07 [b]	0.10 ± 0.00 [b]
LF	Espirulina	0.5	LE3	2.78 ± 0.13 [a]	-0.86 ± 0.03 [b]	4.51 ± 0.14 [a]	0.33 ± 0.14 [a]	34.65 ± 4.59 [a]	0.85 ± 0.12 [a]	0.29 ± 0.02 [a]
LF	Cochayuyo + espirulina	0.5	LCE14	3.87 ± 0.50 [a]	-0.22 ± 0.11 [a]	4.38 ± 0.15 [a]	0.17 ± 0.01 [a]	25.90 ± 2.86 [b]	0.67 ± 0.07 [ab]	0.17 ± 0.03 [ab]
C.V (%)				20.23	15.08	2.80	19.82	13.98	16.55	14.83

Nota. Valor medio ± desviación estándar, a-b: Letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas (P < 0.05). C.V: Coeficiente de variación. LF: Liofilizador; HC: Horno convectivo; HC-IR: Horno túnel asistido con infrarrojo.

Compuestos Bioactivos

Polifenoles Totales

Los polifenoles son compuestos que se han investigado intensamente y representan uno de los metabolitos secundarios de las plantas más conocidos, caracterizándose por un amplio espectro de propiedades bioactivas únicas. Gracias a sus efectos beneficiosos tanto para las plantas como para los seres humanos, son compuestos muy valorados. Desempeñan un papel importante en la prevención de enfermedades degenerativas, como el cáncer y las enfermedades cardiovasculares (Musilová et al., 2024).

Los polifenoles presentes en el cochayuyo no solo brindan protección antioxidante, sino que también contribuyen a mejorar la salud cardiovascular y metabólica (Pacheco et al., 2020). Estos compuestos bioactivos neutralizan los radicales libres, previniendo el daño oxidativo que contribuye al desarrollo

de enfermedades crónicas. Además, debido a su estructura química, los polifenoles del cochayuyo pueden interactuar favorablemente con proteínas y lípidos en los alimentos, lo que aumenta el valor nutricional de los productos elaborados a base de esta alga.

Según Prete et al. (2024) los polifenoles presentes en la espirulina son cruciales debido a sus propiedades antioxidantes, que protegen las células del daño oxidativo provocado por radicales libres, contribuyendo a prevenir enfermedades crónicas como las cardiovasculares, diabetes y ciertos tipos de cáncer. Estos compuestos neutralizan los radicales libres, previniendo el envejecimiento celular y reduciendo la inflamación crónica. Además, los polifenoles de la espirulina refuerzan la respuesta inmunológica y tienen efectos antiinflamatorios, lo que les otorga un valor nutracéutico en la prevención de enfermedades metabólicas y neurodegenerativas, y protegen el ADN al mitigar el estrés oxidativo en los tejidos. Vieira et al. (2020) mencionó en su investigación sobre galletas funcionales impresas en 3D, que el contenido fenólico aumentaba proporcionalmente con la cantidad de microalga agregada.

En el Cuadro 15 se muestra el contenido fenólico total de las tintas alimentarias, los resultados mostraron que las tintas alimentarias IC13 y LE3 presentaron un valor significativamente mayor que LCE14 ($P > 0.05$). Los resultados se vieron influenciados por la combinación de ambas adiciones, lo que pudo haber generado una interacción antagónica entre los compuestos fenólicos, reduciendo la disponibilidad de estos compuestos bioactivos. Según investigaciones como la de Colon y Nerín (2016), mencionan que la mezcla de polifenoles de fuentes como el té verde puede producir efectos antagónicos, esta interacción puede alterar la capacidad de neutralizar radicales libres y la biodisponibilidad total de los compuestos bioactivos.

Actividad Antioxidante

La función de los antioxidantes es neutralizar los radicales libres en las células biológicas, los cuales tienen un impacto negativo en los organismos vivos. La capacidad de las moléculas redox para absorber radicales libres se denomina actividad antioxidante (Bobková et al., 2021). La capacidad antioxidante es un parámetro de calidad popular de los productos alimenticios, y los estudios

confirman el vínculo entre la capacidad antioxidante de la dieta, como medida de la ingesta de antioxidantes, y la salud (Munteanu y Apetrei, 2021).

Se sabe que el cochayuyo tiene altos contenidos de proteínas, aminoácidos esenciales, vitaminas y fibras dietéticas. Muñoz-Molina et al. (2024) mencionan que también es una fuente rica de compuestos bioactivos como los florotaninos y la fucoxantina, además de tener actividad antioxidante y otras propiedades saludables, incluidas actividades antihiperglucémicas, antiobesidad y neuroprotectoras.

La espirulina ha sido ampliamente estudiada por su perfil nutricional y sus propiedades antioxidantes. Contiene ficocianina, un pigmento que le otorga su capacidad antioxidante, ayudando a reducir el daño oxidativo en las células. A diferencia de otras algas, la espirulina destaca por su capacidad de aumentar las enzimas antioxidantes del cuerpo, como la catalasa y el superóxido dismutasa (SOD), lo que contribuye a la protección contra enfermedades degenerativas (Wu et al., 2016). Además, estudios sugieren que su consumo puede mejorar la resistencia a enfermedades inflamatorias, gracias a su capacidad para modular respuestas oxidativas y prevenir el daño celular.

DPPH.

En el Cuadro 15 se muestra la actividad de eliminación de radicales DPPH, este método se utiliza comúnmente para evaluar la actividad antioxidante de los compuestos fenólicos y se basa en la reacción de los antioxidantes con este radical estable. Este ensayo determina la transferencia de átomos de hidrógeno (Pacheco et al., 2020).

Se presentaron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre las tintas realizadas con harina de camote LF y HC-IR, siendo las muestras liofilizadas las que obtuvieron un mayor efecto de eliminación de radicales DPPH. Esto se atribuye a la menor temperatura utilizada en la liofilización, lo que reduce la degradación térmica de los antioxidantes sensibles al calor. Savas (2022) registró un mejor efecto de eliminación de radicales DPPH en muestras de camote liofilizadas que en las muestras secadas con aire caliente. Las temperaturas desempeñan un papel fundamental en la conservación de antioxidantes como los polifenoles, que son muy sensibles al calor. Temperaturas más bajas son

beneficiosas porque ayudan a minimizar la degradación de estos compuestos durante el procesamiento de los alimentos, incluido el secado y la cocción. Según Oliveira et al. (2016) el calor elevado puede provocar una pérdida considerable de polifenoles y otros nutrientes termolábiles, mientras que los tratamientos más suaves a baja temperatura ayudan a preservar su bioactividad y calidad nutricional.

ORAC

El Cuadro 15 muestra los valores de la capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC) para el extracto de las tintas alimentarias. Se puede observar que LCE14 mostró un valor significativamente mayor que LE3 e IC13 ($P < 0.05$). Esta diferencia podría deberse a un efecto sinérgico de la actividad antioxidante de ambas adiciones ingredientes, lo que aumentó su capacidad de absorción de radicales libres. Este tipo de interacción sinérgica ha sido documentado en otros estudios, donde la combinación de polifenoles de diferentes fuentes ha mostrado incrementar su efectividad antioxidante más allá de la suma de los efectos individuales. En un estudio realizado por Nguyen y Karboune (2023) sobre mezclas de polifenoles y extractos vegetales, observaron un aumento sinérgico de la actividad antioxidante medida por ORAC cuando los polifenoles se combinan con aceites esenciales ricos en fenoles, donde los fenoles mejoraron la transferencia de átomos de hidrógeno en la reacción ORAC, lo que resultó en una mayor actividad antioxidante total.

Cuadro 15

Contenido de polifenoles totales y actividad antioxidante (DPPH y ORAC) de las tintas alimentarias.

Factores						
Secado	Adición	Granulometría	Muestra	Polifenoles Totales (mg EAG/g^{-1} DW)	Actividad Antioxidante	
					DPPH (µM ET/g^{-1}DW)	ORAC (µM ET/g^{-1}DW)
HC-IR	Cochayuyo	0.5	IC13	38.27 ± 0.94 ^{a}	6.18 ± 0.07 ^{b}	11.03 ± 1.31 ^{b}
LF	Espirulina	0.5	LE3	37.66 ± 2.57 ^{a}	17.95 ± 0.05 ^{a}	7.82 ± 1.69 ^{c}
LF	Cochayuyo + espirulina	0.5	LCE14	27.76 ± 1.83 ^{b}	17.86 ± 0.21 ^{a}	14.08 ± 1.83 ^{a}
C.V (%)				6.43	0.80	13.79

Nota. Valor medio ± desviación estándar, a-c: Letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas ($P < 0.05$). EAG: Equivalente de ácido gálico; ET: Equivalente de Trolox; DW: Peso seco por sus siglas en inglés; C.V: Coeficiente de variación. LF: Liofilizador; HC: Horno convectivo; HC-IR: Horno túnel asistido con infrarrojo.

Conclusiones

Se determinó que la fidelidad, calidad de impresión y la deformación de las tintas alimentarias fueron influenciadas por la interacción entre el tipo de secado, la adición y la granulometría, que también afectó la fidelidad y deformación en altura. En cuanto a la fidelidad de profundidad, el secado fue el factor más importante, mientras que la adición predominó en la fidelidad del ancho. En la calidad de impresión a las 0 horas, la adición fue el factor influyente, pero a las 2 horas, todos los factores tuvieron un impacto en la calidad. Respecto a la tasa de deformación, la granulometría fue el factor principal, especialmente en la deformación de profundidad y ancho, no se observaron influencias en la deformación del ancho inferior ni en la deformación global.

Se determinó que las tintas alimentarias presentaron un comportamiento reológico pseudoplástico. La adición de cochayuyo incrementó el esfuerzo de corte (τ), viscosidad (K), módulo de almacenamiento (G') y módulo de pérdida (G"), a la vez que disminuyó la tangente de pérdida (tan δ), indicando un comportamiento más sólido. En cuanto al perfil de textura, la adición de espirulina causó un incremento significativo en la adhesividad, elasticidad, gomosidad y masticabilidad, por otro lado, el secado LF contribuyó a una mayor capacidad de resiliencia.

Se cuantificó un mayor contenido de polifenoles totales en las tintas alimentarias cuando en su formulación solo se adicionaba cochayuyo o espirulina, en cuanto a, la actividad antioxidante, DPPH presentó un mayor contenido en las tintas que contenían harina de camote obtenida por liofilización, en cambio, ORAC presentó más contenido debido a la sinergia entre la adición de cochayuyo y espirulina.

Recomendaciones

Evaluar otras tecnologías de impresión 3D de alimentos, como las basadas en inyección de aglutinante o mediante sinterización láser.

Evaluar el posprocesamiento en las estructuras impresas como horneado o freído.

Realizar análisis microbiológicos, sensoriales y evaluar la vida útil y estabilidad de las tintas alimentarias bajo diferentes condiciones de almacenamiento.

Utilizar las tintas alimentarias para desarrollar alimentos impresos en 3D, combinándolas con otros ingredientes que aporten sabores específicos y simulen productos como carne o cheesecake, ofreciendo así alternativas innovadoras y sostenibles en el mercado alimentario.

Realizar un perfil de polifenoles mediante un análisis de HPLC para una cuantificación especifica de compuestos bioactivos.

Referencias

Abka-Khajouei, R., Tounsi, L., Shahabi, N., Patel, A. K., Abdelkafi, S. y Michaud, P. (2022). Structures, properties and applications of alginates. *Marine Drugs*, *20*(6). https://doi.org/10.3390/md20060364

Aravena-Sanhueza, F., Pérez-Rivera, M., Castillo-Felices, R., Mundaca-Uribe, R., Aranda Bustos, M. y Peña Farfal, C. (2020). Determination of antioxidant capacity (ORAC) of Greigia sphacelata and correlation with voltammetric methods. *Journal of the Chilean Chemical Society*, *65*(3), 4925–4928. https://doi.org/10.4067/s0717-97072020000204925

Baliyan, S., Mukherjee, R., Priyadarshini, A., Vibhuti, A., Gupta, A., Pandey, R. P. y Chang, C.-M. (2022). Determination of antioxidants by DPPH radical scavenging activity and quantitative phytochemical analysis of ficus religiosa. *Molecules*, *27*(4). https://doi.org/10.3390/molecules27041326

Bobková, A., Demianová, A., Belej, Ľ., Harangozo, Ľ., Bobko, M., Jurčaga, L., Poláková, K., Božiková, M., Bilčík, M. y Árvay, J. (2021). Detection of changes in total antioxidant capacity, the content of polyphenols, caffeine, and heavy metals of teas in relation to their origin and fermentation. *Foods (Basel, Switzerland)*, *10*(8). https://doi.org/10.3390/foods10081821

Bollom, M. A., Clark, S. y Acevedo, N. C. (2020). Development and characterization of a novel soy lecithin-stearic acid and whey protein concentrate bigel system for potential edible applications. *Food Hydrocolloids*, *101*, 105570. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105570

Chen, X., Zhang, M., Teng, X. y Mujumdar, A. (2022). Internal structure design for improved shape fidelity and crispness of 3D printed pumpkin-based snacks after freeze-drying. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, *157*, 111220. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111220

Colon, M. y Nerín, C. (2016). Synergistic, antagonistic and additive interactions of green tea polyphenols. *European Food Research and Technology*, *242*(2), 211–220. https://doi.org/10.1007/s00217-015-2532-9

Cui, Y., Li, C., Guo, Y., Liu, X., Zhu, F., Liu, Z., Liu, X. y Yang, F. (2022). Rheological & 3D printing properties of potato starch composite gels. *Journal of Food Engineering*, *313*, 110756. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110756

Dankar, I., Pujolà, M., El Omar, F., Sepulcre, F. y Haddarah, A. (2018). Impact of mechanical and microstructural properties of potato puree-food additive complexes on extrusion-based 3D printing. *Food and Bioprocess Technology*, *11*(11), 2021–2031. https://doi.org/10.1007/s11947-018-2159-5

Del Castillo Morgado, L. (2020). *Tendencias y desafíos de la impresión 3D en el procesado de alimentos* [Pregrado]. Universidad de Sevilla, España. https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/103891/DEL%20CASTILLO%20MORGADO%20LUCIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Feng, G., Wang, G., Li, Q., Han, C., Wei, D., Guo, J., Wan, Z., Wang, J. y Yang, X. (2023). Depletion attraction driven formation of Spirulina emulsion gels for 3D printing. *Food Hydrocolloids*, *141*, 108691. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108691

Fredricks, J., Iyer, H., McDonald, R., Hsu, J., Jimenez, A. y Roumeli, E. (2021). Spirulina-based composites for 3D -printing. *Journal of Polymer Science*, *59*(22), 2878–2894. https://doi.org/10.1002/pol.20210683

González, C. (2018). Frutas y verduras perdidas y desperdiciadas, una oportunidad para mejorar el consumo. *Revista Chilena De Nutrición*, *45*(3), 198. https://doi.org/10.4067/s0717-75182018000400198

Grira, S., Khalifeh, H. A., Alkhedher, M. y Ramadan, M. (2023). 3D printing algae-based materials: Pathway towards 4D bioprinting. *Bioprinting*, *33*, e00291. https://doi.org/10.1016/j.bprint.2023.e00291

Guo, X., Wang, Q., Wu, Y., Liu, X. y Gong, Z. (2024). Comprehensive insights into microalgae proteins: Nutritional profiles and innovative applications as sustainable alternative proteins in health and food sciences. *Food Hydrocolloids*, *154*, 110112. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110112

He, C., Zhang, Z. y Guo, C. (2020). 4D printing of mashed potato/purple sweet potato puree with spontaneous color change. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *59*, 102250. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102250

He, H., Wang, Y., Liu, H., Zhang, M. y Ou, X. (2023). Simultaneous quantifying and visualizing moisture, ash and protein distribution in sweet potato Ipomoea batatas (L.) Lam by NIR hyperspectral imaging. *Food Chemistry: X*, *18*, 100631. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100631

How, Y.-K. y Siow, L.-F. (2020). Effects of convection-, vacuum-and freeze-drying on antioxidant, physicochemical properties, functional properties and storage stability of stink bean (Parkia speciosa) powder. *Journal of Food Science and Technology*, *57*(12), 4637–4648. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04501-7

Jiménez-Moreno, N., Volpe, F., Moler, J. A., Esparza, I. y Ancín-Azpilicueta, C. (2019). Impact of extraction conditions on the phenolic composition and antioxidant capacity of grape stem extracts. *Antioxidants*, *8*(12). https://doi.org/10.3390/antiox8120597

Lee, J. H., Won, D. J., Kim, H. W. y Park, H. J. (2019). Effect of particle size on 3D printing performance of the food-ink system with cellular food materials. *Journal of Food Engineering*, *256*, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.014

Lemus-Mondaca, R., Puente-Díaz, L., Vásquez-Montaño, A., León, E., Zura-Bravo, L. y Ortiz-Viedma, J. (2024). Printability and thermophysical properties of three-dimensional-printed food based on "Cochayuyo" Durvillaea antarctica seaweed flour. *Foods (Basel, Switzerland)*, *13*(12). https://doi.org/10.3390/foods13121825

Letras, P., Oliveira, S., Varela, J., Nunes, M. C. y Raymundo, A. (2022). 3D printed gluten-free cereal snack with incorporation of Spirulina (Arthrospira platensis) and/or Chlorella vulgaris. *Algal Research*, *68*, 102863. https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102863

Liu, Y., Liu, D., Wei, G., Ma, Y., Bhandari, B. y Zhou, P. (2018). 3D printed milk protein food simulant: Improving the printing performance of milk protein concentration by incorporating whey protein isolate. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *49*, 116–126. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.018

Liu, Y., Yu, Y., Liu, C., Regenstein, J., Liu, X. y Zhou, P. (2019). Rheological and mechanical behavior of milk protein composite gel for extrusion-based 3D food printing. *LWT*, *102*, 338–346. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.053

Liu, Y., Tang, T., Duan, S., Qin, Z., Li, C., Zhang, Z., Liu, A., Wu, D., Chen, H., Han, G., Lin, B., He, J. y Wu, W. (2020). Effects of sodium alginate and rice variety on the physicochemical characteristics and 3D printing feasibility of rice paste. *LWT*, *127*, 109360. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109360

Madadi, R., Maljaee, H., Serafim, L. S. y Ventura, S. P. M. (2021). Microalgae as contributors to produce biopolymers. *Marine Drugs*, *19*(8). https://doi.org/10.3390/md19080466

Mantihal, S., Prakash, S., Godoi, F. C. y Bhandari, B. (2017). Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *44*, 21–29. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.09.012

Marques, B. C., Plana-Fattori, A., Flick, D. y Tadini, C. C. (2022). Convective drying of yacón (Smallanthus sonchifolius) slices: A simple physical model including shrinkage. *LWT*, *159*, 113151. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113151

Martínez-Monzó, J., Cárdenas, J. y García-Segovia, P. (2019). Effect of temperature on 3D printing of commercial potato puree. *Food Biophysics*, *14*(3), 225–234. https://doi.org/10.1007/s11483-019-09576-0#ref-CR16

McHugh, T. (2017). 3D Food Printing: A new dimension in food production processes. *IFT*, *71*, Artículo 4. https://www.ift.org/news-and-publications/food-technology-magazine/issues/2017/april/columns/processing-3d-food-printing

Muñoz-Molina, N., Parada, J., Simirgiotis, M. y Montecinos-González, R. (2024). The Potential of Using Cochayuyo (Durvillaea incurvata) Extract Obtained by Ultrasound-Assisted Extraction to Fight against Aging-Related Diseases. *Foods (Basel, Switzerland)*, *13*(2). https://doi.org/10.3390/foods13020269

Munteanu, I. G. y Apetrei, C. (2021). Analytical methods used in determining antioxidant activity: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(7). https://doi.org/10.3390/ijms22073380

Musilová, J., Franková, H., Fedorková, S., Lidiková, J., Vollmannová, A., Sulírová, K., Árvay, J. y Kasal, P. (2024). Comparison of polyphenols, phenolic acids, and antioxidant activity in sweet potato (Ipomoea batatas L.) tubers after heat treatments. *Journal of Agriculture and Food Research*, *18*, 101271. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101271

Nguyen, M. M. y Karboune, S. (2023). Combinatorial Interactions of Essential Oils Enriched with Individual Polyphenols, Polyphenol Mixes, and Plant Extracts: Multi-Antioxidant Systems. *Antioxidants*, *12*(2). https://doi.org/10.3390/antiox12020486

Oliveira, S. M., Brandão, T. R. S. y Silva, C. L. M. (2016). Influence of Drying Processes and Pretreatments on Nutritional and Bioactive Characteristics of Dried Vegetables: A Review. *Food Engineering Reviews*, *8*(2), 134–163. https://doi.org/10.1007/s12393-015-9124-0

Organización de las Naciones Unidas. (2022). *El mundo desperdicia más de 1.000 millones de platos de comida al día - informe de la ONU*. https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/el-mundo-desperdicia-mas-de-1000-millones-de-platos-

de#:~:text=En%202022%2C%20se%20generaron%201.050,disponibles%20para%20el%20consumo%20humano.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2022). Hacer frente a la pérdida y el desperdicio de alimentos: una oportunidad de ganar por partida triple. *FAO*. https://www.fao.org/newsroom/detail/FAO-UNEP-agriculture-environment-food-loss-waste-day-2022/es

Pacheco, L. V., Parada, J., Pérez-Correa, J. R., Mariotti-Celis, M. S., Erpel, F., Zambrano, A. y Palacios, M. (2020). Bioactive polyphenols from southern Chile seaweed as inhibitors of enzymes for starch digestion. *Marine Drugs*, *18*(7). https://doi.org/10.3390/md18070353

Prete, V., Abate, A. C., Di Pietro, P., Lucia, M. de, Vecchione, C. y Carrizzo, A. (2024). Beneficial Effects of Spirulina Supplementation in the Management of Cardiovascular Diseases. *Nutrients*, *16*(5). https://doi.org/10.3390/nu16050642

Qiu, R., Wang, K., Tian, H., Liu, X., Liu, G., Hu, Z. y Zhao, L. (2022). Analysis on the printability and rheological characteristics of bigel inks: Potential in 3D food printing. *Food Hydrocolloids*, *129*, 107675. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107675

Restrepo Román, A., Bedoya, I. D. y Amell, A. A. (2023). Comparative, numerical, and experimental study of the influence of infrared radiation on a radiative-convective drying system for kaolin clay. *Case Studies in Thermal Engineering*, *49*, 103329. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103329

Ricci, I., Derossi, A. y Severini, C. (2019). Chapter 5 - 3D Printed food from fruits and vegetables. En Ricci, I., Derossi, A., Severini, C (Ed.), *Fundamentals of 3D food printing and applications* (pp. 117–149). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814564-7.00005-5

Rysenaer, V. B. J., Ahmadzadeh, S., van Bockstaele, F. y Ubeyitogullari, A. (2020). An extrusion-based 3D food printing approach for generating alginate-pectin particles. *Current Research in Food Science*, *6*, 100404. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.11.023

Santos, K. C., Guedes, J. S., Rojas, M. L., Carvalho, G. R. y Augusto, P. E. D. (2021). Enhancing carrot convective drying by combining ethanol and ultrasound as pre-treatments: Effect on product structure, quality, energy consumption, drying and rehydration kinetics. *Ultrasonics Sonochemistry*, *70*, 105304. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105304

Savas, E. (2022). The modelling of convective drying variables' effects on the functional properties of sliced sweet potatoes. *Foods (Basel, Switzerland)*, *11*(5). https://doi.org/10.3390/foods11050741

Sobaszek, P., Różyło, R., Dziki, L., Gawlik-Dziki, U., Biernacka, B. y Panasiewicz, M. (2020). Evaluation of Color, Texture, Sensory and Antioxidant Properties of Gels Composed of Freeze-Dried Maqui Berries and Agave Sugar. *Processes*, *8*(10), 1294. https://doi.org/10.3390/pr8101294

Swe, M. T. H. y Asavapichayont, P. (2018). Effect of silicone oil on the microstructure, gelation and rheological properties of sorbitan monostearate-sesame oil oleogels. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, *13*(5), 485–497. https://doi.org/10.1016/j.ajps.2018.04.006

Thakur, R., Yadav, B. K. y Goyal, N. (2023). An insight into recent advancement in plant- and algae-based functional ingredients in 3D food printing ink formulations. *Food and Bioprocess Technology*, *16*(9), 1919–1942. https://doi.org/10.1007/s11947-023-03040-1

Tian, H., Wang, K., Lan, H., Wang, Y [Yao], Hu, Z. y Zhao, L. (2021). Effect of hybrid gelator systems of beeswax-carrageenan-xanthan on rheological properties and printability of litchi inks for 3D food printing. *Food Hydrocolloids*, *113*, 106482. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106482

Vásquez, A. (2023). *Efecto de harina de alga cochayuyo (Durvillaea antárctica) sobre la capacidad de impresión y propiedades termofísicas de un alimento impreso 3D a base de harina de arroz* [Pregrado, Universidad de Chile, Chile]. repositorio.uchile.cl. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/195748

Vieira, M. V., Oliveira, S. M., Amado, I. R., Fasolin, L. H., Vicente, A. A., Pastrana, L. M. y Fuciños, P. (2020). 3D printed functional cookies fortified with Arthrospira platensis: Evaluation of its antioxidant potential and physical-chemical characterization. *Food Hydrocolloids*, *107*, 105893. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105893

Wang, J [Jian], Jiang, Q., Huang, Z., Muhammad, A. H., Gharsallaoui, A., Cai, M., Yang, K. y Sun, P. (2024). Rheological and mechanical behavior of soy protein-polysaccharide composite paste for extrusion-based 3D food printing: Effects of type and concentration of polysaccharides. *Food Hydrocolloids*, *153*, 109942. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109942

Wang, M., Lu, X., Zheng, X., Li, W., Wang, L., Qian, Y. y Zeng, M. (2023). Rheological and physicochemical properties of Spirulina platensis residues-based inks for extrusion 3D food printing. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, *169*, 112823. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112823

Wu, Q., Liu, L., Miron, A., Klímová, B., Wan, D. y Kuča, K. (2016). The antioxidant, immunomodulatory, and anti-inflammatory activities of Spirulina: An overview. *Archives of Toxicology*, *90*(8), 1817–1840. https://doi.org/10.1007/s00204-016-1744-5

Xu, F., Zhang, L., Liu, W., Liu, Q., Wang, F., Zhang, H., Hu, H. y Blecker, C. (2021). Physicochemical and Structural Characterization of Potato Starch with Different Degrees of Gelatinization. *Foods (Basel, Switzerland)*, *10*(5). https://doi.org/10.3390/foods10051104

Yang, F., Zhang, M. y Liu, Y. (2019). Effect of post-treatment microwave vacuum drying on the quality of 3D-printed mango juice gel. *Drying Technology*, *37*(14), 1757–1765. https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1536884

Yin, Y., Wang, Y., Fang, Q., Xiang, M., Zhao, X., Xu, X. y Li, C. (2024). Effects of pre-formulation and post-cooking method on the rheological and gelation properties of 3D printed chicken products. *Food Chemistry*, *446*, 138857. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138857

Zhang, Y., Lee, A. Y., Pojchanun, K., Lee, C. P., Zhou, A., An, J., Hashimoto, M., Tan, U.-X., Leo, C. H., Wong, G., Chua, C. K. y Pant, A. (2022). Systematic Engineering approach for optimization of multi-component alternative protein-fortified 3D printing food Ink. *Food Hydrocolloids*, *131*, 107803. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107803

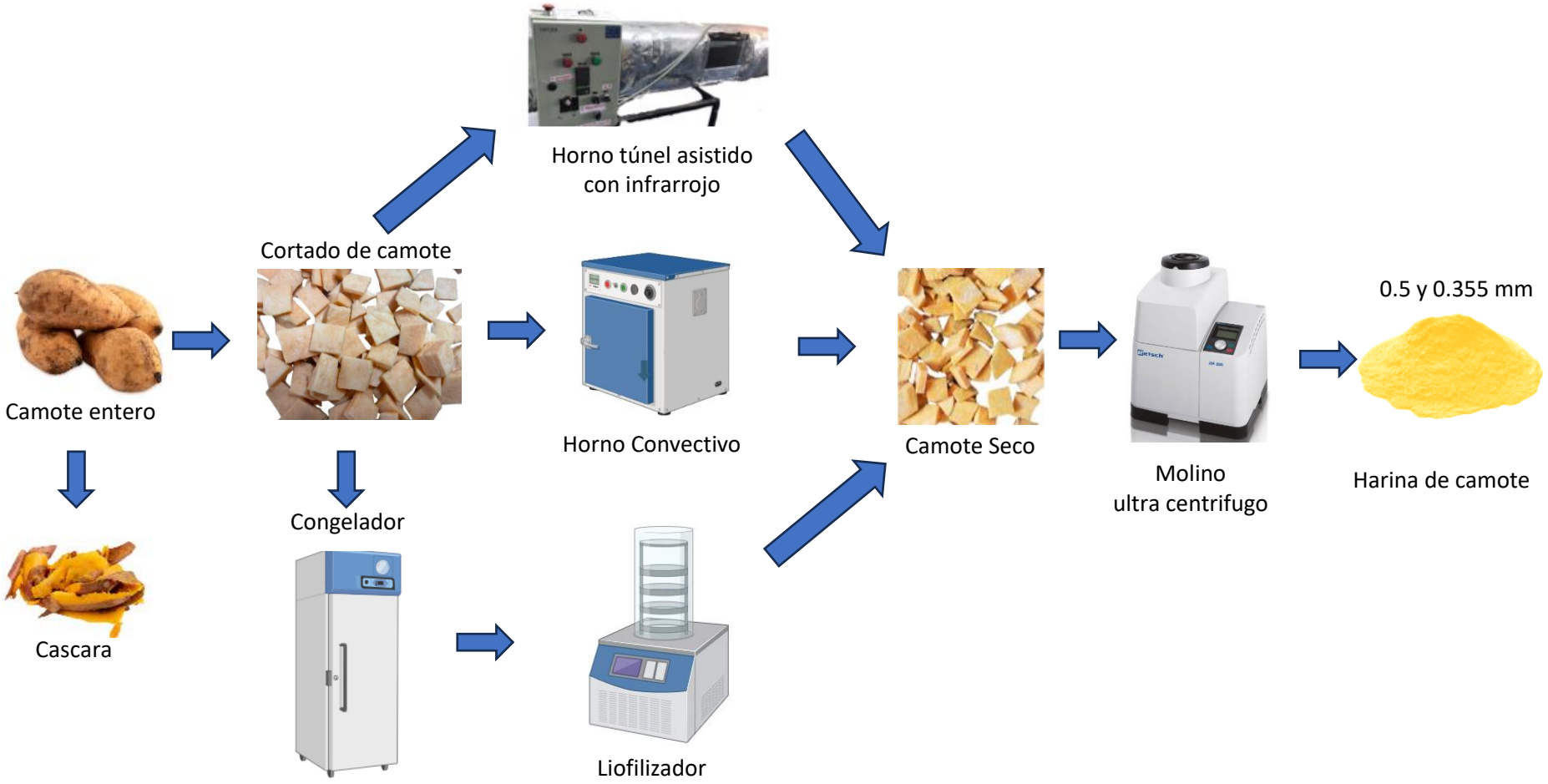
Zhao, Y., Li, Y., Liu, Q., Chen, Q., Fangda, S. y Kong, B. (2024). Investigating the rheological properties and 3D printability of tomato-starch paste with different levels of xanthan gum. *International Journal of Biological Macromolecules*, *257*(Pt 1), 128430. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128430

Zheng, L., Yu, Y., Tong, Z., Zou, Q., Han, S. y Jiang, H. (2019). The characteristics of starch gels molded by 3D printing. *Journal of Food Processing and Preservation*, *43*(7). https://doi.org/10.1111/jfpp.13993

Anexos

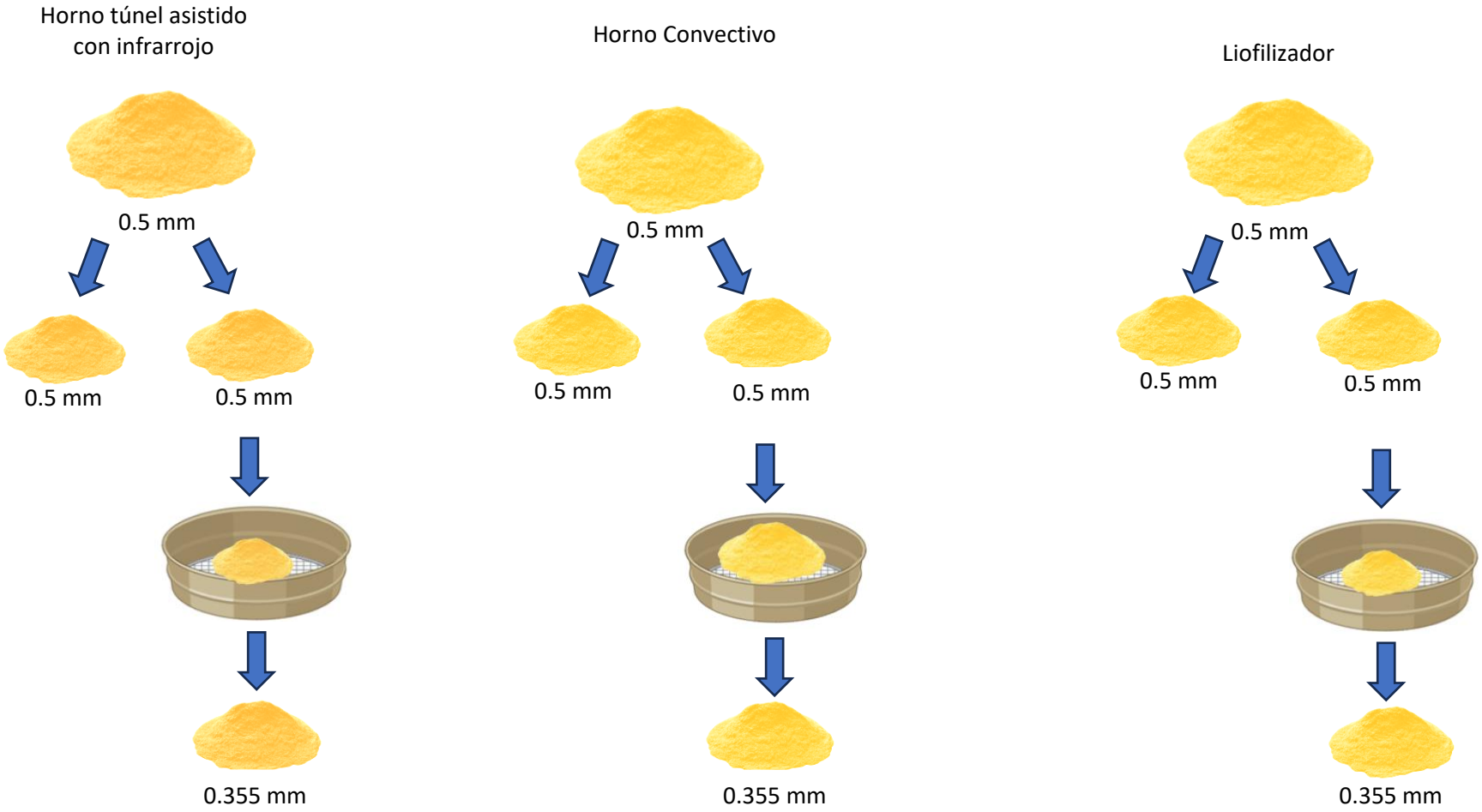
Anexo A

Diagrama de flujo para la obtención de harina de camote por diferentes métodos de secado.



Anexo B

Diagrama de flujo de tamizado de la harina de camote obtenida por diferentes métodos de secado.



Anexo C

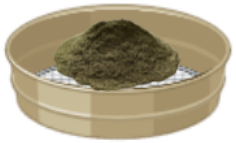
Diagrama de flujo para la obtención de harina de cochayuyo y espirulina en polvo.

Cochayuyo

Trozos de cochayuyo

Molino ultra centrifugo

Harina de cochayuyo 0.5 mm



Tamizado

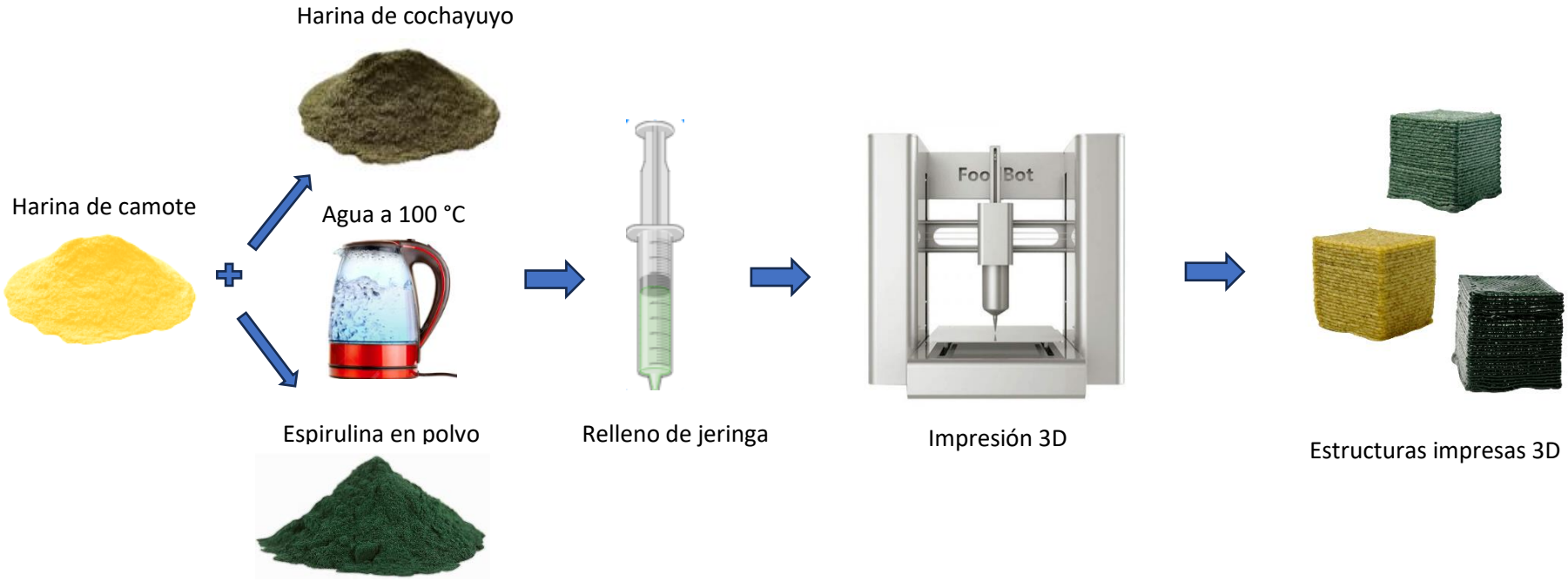
Harina de cochayuyo ≤ 0.355 mm

Envase comercial de espirulina

Espirulina en polvo

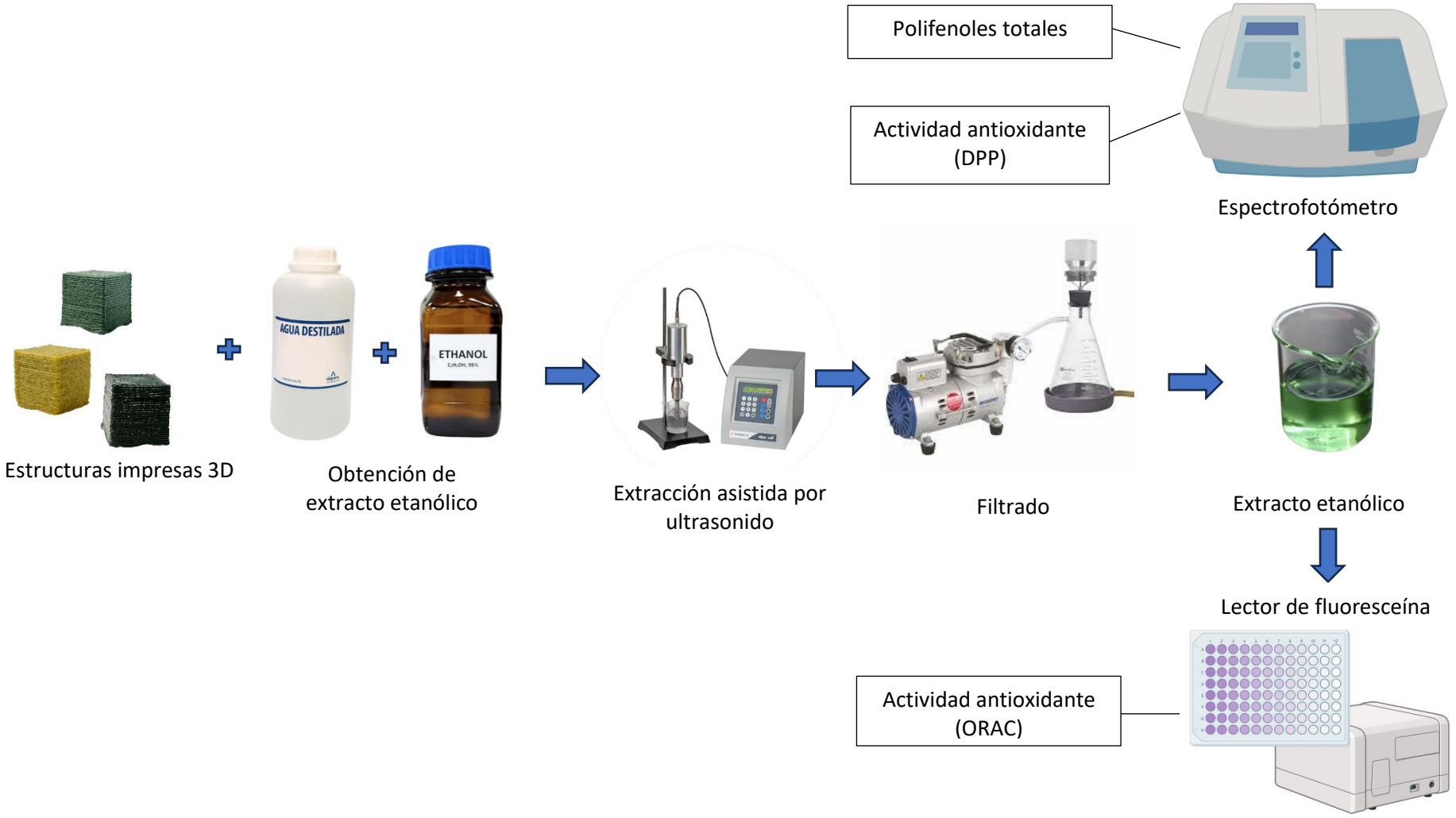
Anexo D

Diagrama de flujo para impresión de tintas alimentarias.



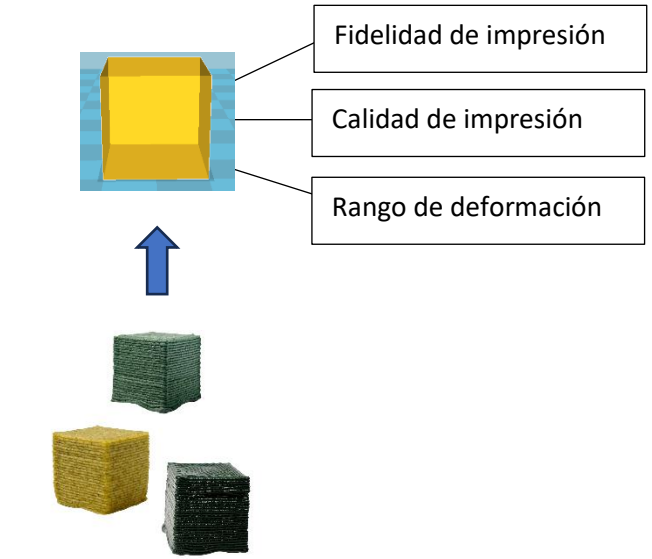
Anexo E

Diagrama de flujo de análisis químicos realizados a las estructuras impresas en 3D.



Anexo F

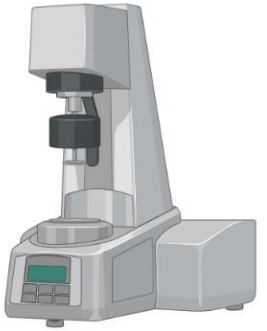
Diagrama de flujo de análisis físicos realizados a las tintas y estructuras impresas en 3D.



Estructuras impresas 3D

Análisis de perfil de textura

Tintas alimentarias



Reología de las tintas alimentarias

Anexo G

Medidas de los cubos hechos con adición de cochayuyo o espirulina inmediatamente después de la impresión.

Muestra	Altura (mm) Media ± D.E.	Profundidad inferior (mm) Media ± D.E.	Profundidad superior (mm) Media ± D.E.	Ancho inferior (mm) Media ± D.E.	Ancho superior (mm) Media ± D.E.
LC2	19.83±0.21 [a]	21.50±1.25 [bcd]	19.23±0.31 [bc]	21.47±0.93 [abc]	19.10±0.40 [bc]
LE3	20.07±0.06 [a]	21.37±0.31 [bcd]	19.23±0.12 [bc]	21.27±0.57 [abc]	19.13±0.12 [bc]
LE4	19.97±0.50 [a]	21.47±0.57 [bcd]	18.77±0.21 [d]	21.60±1.04 [abc]	18.60±0.00 [d]
LC5	19.97±0.06 [a]	20.40±0.10 [d]	19.47±0.23 [ab]	20.87±0.35 [bc]	19.30±0.26 [abc]
CC6	19.87±0.51 [a]	22.57±0.45 [ab]	19.33±0.25 [ab]	22.30±0.36 [a]	19.33±0.31 [abc]
CE7	20.07±0.12 [a]	23.00±0.61 [a]	19.53±0.40 [ab]	22.57±0.59 [a]	19.20±0.36 [abc]
CE8	20.10±0.10 [a]	21.70±1.05 [abcd]	19.43±0.31 [ab]	22.40±0.50 [a]	19.27±0.15 [abc]
CC9	20.03±0.06 [a]	20.77±0.91 [cd]	19.73±0.23 [a]	20.47±0.81 [c]	19.70±0.44 [a]
IC10	19.93±0.15 [a]	20.67±0.93 [d]	18.90±0.17 [cd]	20.83±1.04 [bc]	19.00±0.00 [cd]
IE11	19.77±0.21 [a]	21.60±0.17 [bcd]	19.43±0.25 [ab]	21.67±0.12 [abc]	19.57±0.06 [ab]
IE12	19.87±0.23 [a]	22.13±0.61 [abc]	18.87±0.06 [cd]	22.07±0.21 [ab]	18.90±0.26 [cd]
IC13	19.83±0.21 [a]	20.73±0.80 [a]	19.43±0.15 [ab]	20.67±0.76 [c]	19.57±0.15 [ab]

Nota. Valor medio ± desviación estándar, letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas ($P < 0.05$).

Anexo H

Medidas de los cubos hechos con adición de cochayuyo y espirulina inmediatamente después de la impresión.

Muestra	Altura (mm)	Profundidad inferior (mm)	Profundidad superior (mm)	Ancho inferior (mm)	Ancho superior (mm)
	Media ± D.E.	Media ± D.E.	Media ± D.E.	Media ± D.E.	Media ± D.E.
LC2	19.83±0.21 [a]	21.50±1.25 [bcd]	19.23±0.31 [bc]	21.47±0.93 [abc]	19.10±0.40 [bc]
LE3	20.07±0.06 [a]	21.37±0.31 [bcd]	19.23±0.12 [bc]	21.27±0.57 [abc]	19.13±0.12 [bc]
LE4	19.97±0.50 [a]	21.47±0.57 [bcd]	18.77±0.21 [d]	21.60±1.04 [abc]	18.60±0.00 [d]
LC5	19.97±0.06 [a]	20.40±0.10 [d]	19.47±0.23 [ab]	20.87±0.35 [bc]	19.30±0.26 [abc]
CC6	19.87±0.51 [a]	22.57±0.45 [ab]	19.33±0.25 [ab]	22.30±0.36 [a]	19.33±0.31 [abc]
CE7	20.07±0.12 [a]	23.00±0.61 [a]	19.53±0.40 [ab]	22.57±0.59 [a]	19.20±0.36 [abc]
CE8	20.10±0.10 [a]	21.70±1.05 [abcd]	19.43±0.31 [ab]	22.40±0.50 [a]	19.27±0.15 [abc]
CC9	20.03±0.06 [a]	20.77±0.91 [cd]	19.73±0.23 [a]	20.47±0.81 [c]	19.70±0.44 [a]
IC10	19.93±0.15 [a]	20.67±0.93 [d]	18.90±0.17 [cd]	20.83±1.04 [bc]	19.00±0.00 [cd]
IE11	19.77±0.21 [a]	21.60±0.17 [bcd]	19.43±0.25 [ab]	21.67±0.12 [abc]	19.57±0.06 [ab]
IE12	19.87±0.23 [a]	22.13±0.61 [abc]	18.87±0.06 [cd]	22.07±0.21 [ab]	18.90±0.26 [cd]
IC13	19.83±0.21 [a]	20.73±0.80 [a]	19.43±0.15 [ab]	20.67±0.76 [c]	19.57±0.15 [ab]

Nota. Valor medio ± desviación estándar, letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas ($P < 0.05$).

Anexo I

Medidas de los cubos hechos con adición de cochayuyo o espirulina después de 2 h a temperatura ambiente.

Muestra	Altura (mm) Media ± D.E.	Profundidad inferior (mm) Media ± D.E.	Profundidad superior (mm) Media ± D.E.	Ancho inferior (mm) Media ± D.E.	Ancho superior (mm) Media ± D.E.
LCE14	19.50±0.62 [ab]	20.67±0.59 [b]	19.13±0.12 [a]	20.97±1.12 [b]	18.93±0.23 [a]
CCE15	19.47±0.55 [a]	21.63±0.65 [a]	18.60±0.62 [a]	21.00±0.30 [b]	18.60±0.26 [a]
ICE16	20.07±0.06 [a]	22.23±1.15 [a]	19.00±0.30 [a]	22.30±0.44 [a]	18.97±0.06 [a]

Nota. Valor medio ± desviación estándar, letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas ($P < 0.05$).

Anexo J

Medias de los cubos hechos con adición de cochayuyo y espirulina después de 2 h a temperatura ambiente.

Muestra	Altura (mm) Media ± D.E.	Profundidad inferior (mm) Media ± D.E.	Profundidad superior (mm) Media ± D.E.	Ancho inferior (mm) Media ± D.E.	Ancho superior (mm) Media ± D.E.
LCE14	19.50±0.62 [ab]	20.67±0.59 [b]	19.13±0.12 [a]	20.97±1.12 [b]	18.93±0.23 [a]
CCE15	19.47±0.55 [a]	21.63±0.65 [a]	18.60±0.62 [a]	21.00±0.30 [b]	18.60±0.26 [a]
ICE16	20.07±0.06 [a]	22.23±1.15 [a]	19.00±0.30 [a]	22.30±0.44 [a]	18.97±0.06 [a]

Nota. Valor medio ± desviación estándar, letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas ($P < 0.05$).

Anexo K

Interacción de factores en análisis de cubos impresos en 3D

	Secado	Adición	Granulometría	Secado x adición x granulometría
Fidelidad altura	0.0485	0.0007	0.0610	0.0003
Fidelidad profundidad	0.0098	0.0109	0.4719	0.0462
Fidelidad ancho	0.0085	0.0003	0.0717	0.8107
Calidad de impresión (0 h)	0.0410	0.0270	0.0632	0.1276
Calidad de impresión (2 h)	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Deformación altura	0.2373	0.0038	0.0683	0.0004
Deformación profundidad inferior	0.2488	0.5520	0.0448	0.6008
Deformación profundiad superior	0.0578	0.3743	0.0002	0.5289
Deformación ancho inferior	0.0680	0.5096	0.3865	0.3132
Deformación ancho superior	0.0171	0.0766	0.0007	0.2094
Deformación global	0.0628	0.7886	0.2120	0.3600

Anexo L

Resultados de análisis de medidas repetidas en el tiempo a las 0 y 2 horas de las estructuras impresas en 3D.

	Tratamiento	Tiempo	Tratamiento x tiempo
Calidad de impresión	<.0001	<.0001	<.0001
Calidad de impresión (0 h)	<.0001		
Calidad de impresión (2 h)	<.0001		

Anexo M

Datos de los resultados del reómetro sobre la viscosidad aparente de las tintas alimentarias.

Velocidad de corte 1/s	Muestra		
	IC13	LE3	LCE14
5.043E-05	232900.24 ± 188.32 [a]	84730 ± 194.78 [c]	103200 ± 218.33 [b]
2.25	498.60 ± 29.65 [a]	365.70 ± 34.45 [c]	416.90 ± 55.03 [b]
4.48	293.40 ± 25.79 [a]	230.70 ± 16.88 [c]	263.8 ± 21.25 [b]
6.72	213.20 ± 20.80 [a]	169.20 ± 11.55 [c]	199.80 ± 10.95 [b]
8.86	174.50 ± 10.19 [a]	134.70 ± 8.99 [c]	166.20 ± 9.34 [b]
11.20	149.00 ± 27.46 [a]	112.60 ± 8.41 [c]	146.20 ± 15.08 [b]
13.41	134.30 ±19.74 [a]	95.21 ± 6.37 [c]	122.30 ± 17.21 [b]
15.52	122.20 ± 8.85 [a]	81.50 ± 4.80 [c]	97.71 ± 16.60 [b]
17.86	106.60 ± 8.56 [a]	72.41 ± 4.20 [c]	81.27 ± 13.77 [b]
19.99	99.90 ± 19.83 [a]	64.41 ± 3.83 [c]	71.83 ± 10.89 [b]

Anexo N

Datos de los resultados del reómetro sobre la curva de flujo de las tintas alimentarias.

Velocidad de corte 1/s	Muestra		
	IC13	LE3	LCE14
5.043E-05	19.93 ± 0.17 [a]	19.09 ± 0.04 [c]	19.43 ± 0.20 [b]
2.25	1138.21 ± 14.26 [a]	831.80 ± 81.37 [c]	1077.12 ± 31.17 [b]
4.48	1312.18 ± 27.71 [a]	1041.28 ± 79.22 [c]	1222.81 ± 26.55 [b]
6.72	1408.32 ± 45.61 [a]	1135.24 ± 77.05 [c]	1363.23 ± 41.56 [b]
8.86	1515.11 ± 69.28 [a]	1208.11 ± 82.73 [c]	1442.10 ± 42.72 [b]
11.20	1674.39 ± 142.02 [a]	1255.09 ± 94.36 [c]	1530.93 ± 13.27 [b]
13.41	1831.12 ±148.95 [a]	1266.23 ± 82.77 [c]	1568.21 ± 16.35 [b]
15.52	1921.22 ± 56.00 [a]	1274.85 ± 77.10 [c]	1632.32 ± 32.33 [b]
17.86	1897.82 ± 17.89 [a]	1292.22 ± 76.42 [c]	1603.28 ± 67.54 [b]
19.99	1824.18 ± 29.44 [a]	1288.31 ± 74.62 [c]	1630.81 ± 173.78 [b]

Anexo O

Datos de los resultados del reómetro sobre el módulo de almacenamiento (G') de las tintas alimentarias.

Frecuencia Hz	Muestra		
	IC13	LE3	LCE14
0.1	21960 ± 1128 [a]	10740 ± 1783 [c]	14330 ± 3465 [b]
0.25	28890 ± 2600 [a]	11070 ± 3627 [c]	20640 ± 4467 [b]
0.4	32000 ± 1900 [a]	12540 ± 2534 [c]	25440 ± 3726 [b]
0.55	35440 ± 2890 [a]	13790 ± 3527 [c]	28050 ± 2546 [b]
0.7	36410 ± 3000 [a]	14780 ± 2783 [c]	29020 ± 1983 [b]
0.85	38430 ± 3190 [a]	15270 ± 1987 [c]	31780 ± 3638 [b]
1	37900 ± 1809 [a]	15840 ± 3749 [c]	33630 ± 3890 [b]
2.5	42820 ± 2310 [a]	18700 ± 2435 [c]	34950 ± 2738 [b]
4	45260 ± 3245 [a]	20610 ± 3267 [c]	35140 ± 3658 [b]
5.5	47390 ± 3573 [a]	20570 ± 2527 [c]	34550 ± 2521 [b]
7	45830 ± 2879 [a]	18710 ± 3261 [c]	34680 ± 2531 [b]
8.5	46510 ± 3284 [a]	19630 ± 2971 [c]	35480 ± 2436 [b]
10	45230 ± 1394 [a]	18460 ± 3813 [c]	35520 ± 2356 [b]

Anexo P

Datos de los resultados del reómetro sobre el módulo de perdida (G'') de las tintas alimentarias.

Frecuencia Hz	Muestra		
	IC13	LE3	LCE14
0.1	6710 ± 705 [a]	3063 ± 548 [c]	5236 ± 109 [b]
0.25	7387 ± 421 [a]	3359 ± 482 [c]	5479 ± 232 [b]
0.4	7276 ± 468 [a]	3543 ± 432 [c]	6071 ± 541 [b]
0.55	8149 ± 781 [a]	3456 ± 524 [c]	5722 ± 585 [b]
0.7	8008 ± 377 [a]	4194 ± 695 [c]	6513 ± 410 [b]
0.85	7559 ± 289 [a]	3477 ± 114 [c]	6161 ± 674 [b]
1	6830 ± 277 [a]	2983 ± 132 [c]	5630 ± 470 [b]
2.5	7014 ± 680 [a]	2935 ± 693 [c]	5090 ± 437 [b]
4	8615 ± 565 [a]	3862 ± 608 [c]	6376 ± 300 [b]
5.5	8010 ± 230 [a]	3908 ± 644 [c]	7482 ± 608 [b]
7	8570 ± 699 [a]	3476 ± 636 [c]	6032 ± 687 [b]
8.5	9790 ± 197 [a]	4059 ± 160 [c]	7076 ± 449 [b]
10	10360 ± 430 [a]	5191 ± 409 [c]	9824 ± 345 [b]

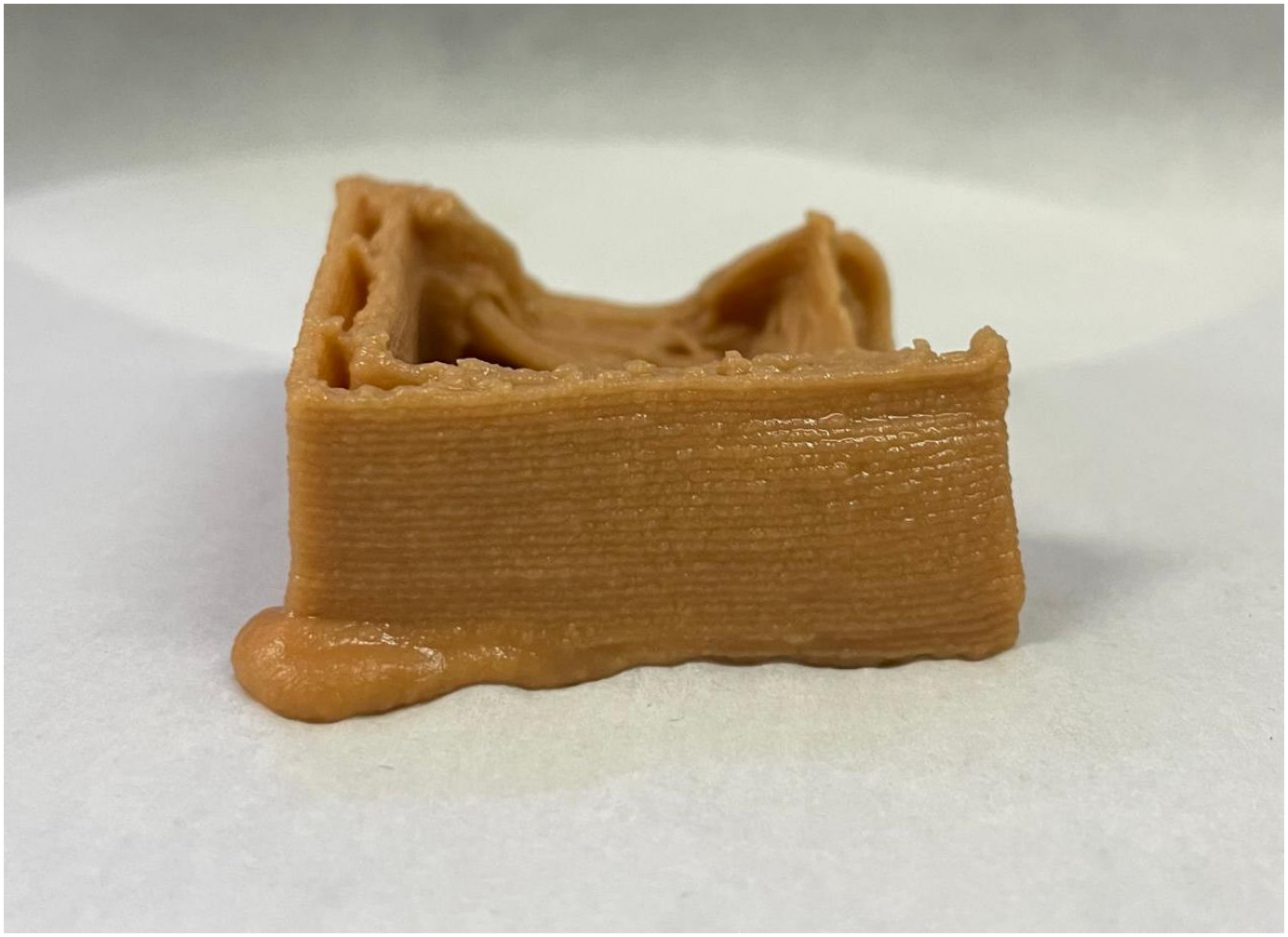
Anexo Q

Datos de los resultados del reómetro sobre la tangente de pérdida (tan δ) de las tintas alimentarias

Frecuencia Hz	Muestra		
	IC13	LE3	LCE14
0.1	0.31 ± 0.00 [b]	0.31 ± 0.02 [b]	0.37 ± 0.00 [a]
0.25	0.26 ± 0.02 [b]	0.30 ± 0.01 [a]	0.27 ±0.00 [b]
0.4	0.23 ± 0.01 [a]	0.28 ± 0.01 [a]	0.24 ± 0.01 [a]
0.55	0.23 ± 0.01 [a]	0.25 ± 0.01 [a]	0.20 ± 0.01 [a]
0.7	0.22 ± 0.00 [b]	0.28 ± 0.02 [a]	0.22 ± 0.01 [b]
0.85	0.20 ± 0.02 [a]	0.23 ± 0.01 [a]	0.19 ± 0.02 [a]
1	0.18 ± 0.01 [a]	0.19 ± 0.02 [a]	0.17 ± 0.00 [a]
2.5	0.16 ± 0.00 [a]	0.16 ± 0.02 [a]	0.15 ± 0.00 [a]
4	0.19 ± 0.00 [a]	0.19 ± 0.02 [a]	0.18 ± 0.00 [a]
5.5	0.17 ± 0.01 [b]	0.19 ± 0.00 [ab]	0.22 ± 0.03 [a]
7	0.19 ± 0.02 [a]	0.19 ± 0.01 [a]	0.17 ± 0.00 [a]
8.5	0.21 ± 0.00 [a]	0.21 ± 0.00 [a]	0.20 ± 0.02 [a]
10	0.23 ± 0.02 [c]	0.32 ± 0.01 [a]	0.28 ± 0.01 [b]

Anexo R

Distintos modelos impresos con las tintas alimentarias estudiadas.

Anexo S

Impresión fallida solo con camote.