

Desarrollo de un sistema de alimentos impresos 3D a partir de ingredientes nutritivos en polvo micro y nanoencapsulados

3D printed food system development based on nanoencapsulated and micro powder nutritious ingredients

Hernán Darío Mejía Vásquez ¹, Gustavo Rafael Hernández-Sandoval ².

ALSEC S. A. S. La Estrella, Antioquia, Colombia. ✉ liderinvestigacion3@alsec.com.co

ALSEC S. A. S. La Estrella, Antioquia, Colombia. ✉ liderinvestigacion4@alsec.com.co

Recibido: 01/07/2021 Aceptado: 20/10/2021

Resumen Los productos alimenticios desarrollados se basan principalmente en la mezcla de ingredientes en polvo obtenidos mediante la tecnología de *spray dry* que, junto con un ingrediente líquido, forma una mezcla homogénea que alcanza un comportamiento de fluidez dentro del cartucho de la impresora durante el proceso de extrusión, el material depositado o extruido debe presentar un buen balance entre fluidez y rigidez para soportar la carga de las capas depositadas, y presentar de esta manera una impresión estructuralmente estable. Posteriormente se realizaron estudios de costos de producción de los productos y se realizaron análisis sensoriales y reológicos.

Palabras clave: impresión 3D; alimentos en polvo; matrices alimentarias; microencapsulación; nanoencapsulación.

Abstract The products developed are mainly based on the mixture of powdered food ingredients obtained through the *spry dry* technology that together with a liquid ingredient form a homogeneous mixture reaches a fluidity behavior inside the printer cartridge during the extrusion process, the deposited or extruded material must present a good balance between fluidity and rigidity to support the load of the deposited layers, thus presenting a structurally stable print. Subsequently, production cost studies of the products were carried out and sensory and rheological analyses were performed.

Keywords: 3D printing; powder food; food matrix; microencapsulation; nanoencapsulation.

Introducción

La impresión 3D es un proceso de fabricación automatizado mediante la adición o deposición capa por capa, donde un objeto tridimensional es creado por la superposición de las capas sucesivas de material (Piyush; Kumar; Kumar, 2020). La impresión 3D también se conoce como fabricación aditiva, y es una de las técnicas de fabricación más precisas con potencial de aplicación en casi todos los campos industriales, comerciales e incluso domésticos. En la actualidad se viene implementando su estudio en el área de los alimentos, pues se ha convertido en un tema novedoso y de interés en la comunidad científica debido al aumento en las publicaciones durante los últimos años, que han impactado favorablemente el sector de los alimentos debido a su gran potencial para fabricar estructuras 3D con geometrías complejas, texturas elaboradas, contenidos nutricionales potencialmente mejorados y una nueva presentación de los alimentos.

La primera impresora 3D en funcionamiento se desarrolló en la década de 1980, y utilizó fotopolímero y plástico como material de aporte o de impresión (Horvath, 2014). A medida que avanzaba su desarrollo y su potencial de aplicación, también se innovaba en los tipos de materiales que se podían imprimir, como metales y cerámicos de acuerdo con las necesidades que se presentaban, pero no era posible emplear este tipo de aparatos para imprimir alimentos, por lo cual la primera impresora 3D de alimentos se desarrolló durante el año 2009, con un extrusor basado en jeringas para depositar pastas alimenticias en una plataforma (Cohen *et al.*, 2009; Zhu; Stieger; van der Goot; Schutyser, 2019).

La tecnología de impresión de alimentos 3D es muy reciente, por lo que sigue siendo un desafío lograr obtener alimentos que presenten fácil imprimibilidad y garantizar la calidad de los productos impresos en términos de estabilidad estructural. Sin embargo, se

ha logrado con éxito obtener estructuras estables mediante los procesos de impresión con diferentes clases de alimentos, donde en ocasiones es necesario emplear aditivos como gomas y almidones (Pérez; Nykvist; Brøgger; Larsen; Falkeborg, 2019) que permitan alcanzar una consistencia adecuada que brinde mayor estabilidad.

Un material alimenticio adecuado para el proceso de impresión 3D va a depender de sus propiedades fisicoquímicas y reológicas, por lo cual se han establecido criterios para evaluar la idoneidad del material. De acuerdo con Godoi, Prakash y Bhandari (2016), los criterios de imprimibilidad establecidos son la facilidad para depositar capa por capa y la capacidad de mantener la estructura estable después del proceso de impresión, e incluso después de un posprocesamiento, si es necesario (horneado) (Godoi *et al.*, 2016).

En el mercado actual se pueden encontrar una gran variedad de impresoras de alimentos, como la ChefJet, diseñada para crear estructuras de chocolate y azúcar. La empresa italiana Berrilla no quiso quedarse atrás, al desarrollar en el 2016 una impresora 3D para pasta fresca, sin embargo, la empresa norteamericana 3D Systems innovó con la impresión de chocolate, bautizando a su dispositivo con el nombre de CocoJet, y finalmente el estudio de diseño de Dovetailed desarrolló una impresora 3D para frutas, la cual se basa en la combinación de zumo de fruta y alginato de sodio en polvo (Bitfab, 2019). Por lo anterior, la Foodini es la impresora más popular en el mercado debido a que integra la funcionalidad y aplicación de las demás impresoras.

La impresión 3D está siendo, sin lugar a duda, una de las revoluciones más importantes en los últimos años, donde aún no hemos visto su verdadero potencial aplicativo y tecnológico, es por ello que su interés en la comunidad científica e industrial crece exponencialmente.

Detalles experimentales

Secado por aspersión

Los productos mora-*açaí* en polvo (pulpa de *açaí*, pulpa de mora y maltodextrina), queso en polvo (queso fresco, maltodextrina) y galleta (grasa vegetal, harina de trigo, sal, huevo en polvo y minerales) fueron microencapsulados mediante *spray dry* por la compañía ALSEC S. A. S.

Diseño y formulación de productos de premezcla

Posterior a los procesos de secado por aspersión, se realizaron los diseños de la mezcla en polvo que cumplieran con los requerimientos nutricionales como carbohidratos, grasa, proteína y micronutrientes, además de los requerimientos funcionales que cumplieran con las características de textura para que sean impresos y contribuyan a un producto final sensorialmente aceptable.

Impresora 3D

Inicialmente, los productos en polvo fueron hidratados con agua y mezclados hasta obtener una masa homogénea. La extrusión del material se realizó con jeringa de forma manual, asegurándose de que no queden burbujas de aire para realizar un adecuado depósito del alimento mediante la técnica de capa por capa, y simulando de esta manera la operación de la impresora para elegir la mezcla adecuada y posteriormente usar la impresora 3D Foodini.

Para las impresiones 3D se empleó una impresora de alimentos Foodini, creada por Natural Machines, los cartuchos o cápsulas son elaboradas de acero inoxidable, lo que evita la retención de olores y sabores, además de facilitar la limpieza y desinfección para ser reutilizada. Dos (2) boquillas de diámetros de 1,5 mm y 4,0 mm fueron utilizadas para la impresión de los productos, la primera boquilla se empleó para la mora-*açaí* y el queso, mientras que la segunda

para la galleta, ya que dicho producto, por su consistencia, dificultaba el proceso de extrusión en la boquilla de 1,5 mm de diámetro

Ensayos reológicos

Los análisis reológicos se realizaron mediante un reómetro de marca Medingen GmbH, serie RHEOTEST RN, para determinar las zonas viscoelásticas. Los métodos empleados fueron oscilación con barrido de frecuencia y oscilación con barrido de amplitud.

Análisis bromatológicos y nutricional

Los métodos utilizados para los análisis bromatológicos y nutricionales de los productos en polvo (galleta, queso y mora-*açaí*) se muestran en la Tabla 1.

Análisis sensorial

Se realizó un análisis a partir de una prueba afectiva para evaluar los diferentes productos, para ello se determinaron diferentes aspectos como sabor, forma, color, aroma, textura al tocarlo, sensación en la boca y calidad del producto en general, lo anterior se evaluó con consumidores finales con un rango de edad de 16-70 años. La prueba consistió en otorgarle a cada persona una muestra del alimento para que lo consumiera, y posteriormente se le indicó que registrara en un formato que contenía la escala hedónica, el nivel de agrado de acuerdo con su percepción. Tal como se observa en la Figura 1, a los participantes no se les permitía compartir información con otra persona acerca de la evaluación sensorial para evitar el sesgo en los resultados. El total de muestreo por producto fue de 50 personas.

Resultados y discusión

Se presentan los estudios realizados a los 3 productos con potencial aplicación a la tecnología de impresión 3D de alimentos

Tabla 1. Métodos utilizados para los análisis bromatológicos y nutricional de las muestras en polvo

Muestra	Parámetros analizados	Método/técnica
Galleta en polvo	Humedad (en harinas, cereales y productos de panadería) g/100g	AOAC 925.10. Ed 21:2019. (Gravimetría, Secado por estufa) Acreditado
Queso en polvo y mora-açaí en polvo	Humedad g/100g	P-LF-008 Versión 3 (Gravimetría-Secado en estufa a 105°C)
Galleta en polvo, queso en polvo y mora-açaí en polvo	Sólidos totales g/100g	P-LF-008 Versión 3 (Gravimetría-cálculo por diferencia)
	Proteína total g/100g	ISO 1871:2009 (Kjeldahl) (Alimentos para consumo humano y animal) Acreditado
Galleta en polvo	Grasa total g/100g	AOAC 920.85. Ed. 21:2019 (Extracción etérea, Soxhlet)
Queso en polvo y mora-açaí en polvo	Grasa total g/100g	AOAC 922.06. Ed. 21:2019 (Hidrólisis ácida)
Galleta en polvo, queso en polvo y mora-açaí en polvo	Fibra cruda g/100g	AOAC 962.09. Ed 21:2019 (Hidrólisis ácida, alcalina y calcinación)
	Fibra dietaria total g/100g	AOAC 985.29. Ed. 21:2019 (Enzimático-gravimétrico)
Galleta en polvo	Cenizas (en harinas, cereales y productos de panadería) g/100g	AOAC 923.03. Ed.21:2019 (Gravimetría, calcinación 550 °C) Acreditados
	Cenizas g/100g	P-LF-001 Versión 5 (Gravimetría-calcinación a 600 °C)
	Carbohidratos totales g/100g	AOAC 986.25 (E). Ed. 21:2019 (Determinación por diferencia)
	Carbohidratos disponibles g/100g	Food composition data de H. Greenfield y D.A.T. Southgate Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome 2012
Queso en polvo y mora-açaí en polvo	Azúcares totales g/100g	AOAC 923.09. Ed 21:2019 (Lane-Eynon)
	Calorías mg/100g	Determinación Indirecta factor de Atwater
	Hierro (Fe) mg/100g	AOAC 985.35. Ed. 21:2019 (Espectrofotometría de absorción atómica). Acreditado
	Calcio (Ca) mg/100g	
	Sodio (Na) mg/100g	
	Vitamina A UI/100g	P-LF-043 Versión 4 (Cromatografía líquida de alta eficiencia, HPLC)
Galleta en polvo, queso en polvo y mora-açaí en polvo	Vitamina C (Ácido Ascórbico) mg/100g	P-LF-042 Versión 5 (Cromatografía líquida de alta eficiencia, HPLC)
	Grasa saturada g/100g	
	Grasa monoinsaturada g/100g	
	Grasa poliinsaturada g/100g	
	Grasa insaturada total g/100g	P-LF-106 Versión 1 (Cromatografía de gases GC-FID)
	Grasa cis g/100g	
	Grasas trans g/100g	
	Contenido de Omega 3 g/100g	
	Contenido de Omega 6 g/100g	
	Contenido de Omega 9 g/100g	
	Colesterol mg/100g	P-LF-108 Versión 1 (Cromatografía de gases GC-FID)
	Zinc (Zn) mg/100g	AOAC 985.35. Ed. 21:2019 (Espectrofotometría de absorción atómica)

Fuente: elaboración propia.

Sistema I. Queso

La fácil extrusión y una textura que permita mantener una estructura 3D formada capa a capa son factores importantes para imprimibilidad del material. Por ende, se realizaron varios ensayos con 10 g de queso en polvo, y se variaron las cantidades de agua para obtener una mezcla homogénea donde se verificaron las variables anteriormente mencionadas mediante la extrusión manual de una jeringa, simulando de esta manera el proceso de impresión. Posteriormente, y basándose en los resultados obtenidos, se eligió a muestra que presentó el mejor balance entre fluidez y firmeza o estabilidad estructural.

En la Figura 1 se logra observar cómo mejora la textura y la rigidez de las capas de material alimenticio con la disminución de la cantidad de agua en la mezcla del queso en polvo.

Las cantidades de agua que presentaron mejor comportamiento en su textura fueron 3,5 y 4 g de agua, por lo cual se prepara cada mezcla y se introduce en el cartucho de la impresora para su posterior impresión. El material alimenticio con 3,5 g agua no fue lo suficientemente fluido, lo que impidió la extrusión, y por ende la correcta impresión en la boquilla # 15 (el diámetro es de aproximadamente 1,5 mm). Por otro lado, la reconstitución de los polvos de queso con 4 g de agua presentó la textura y fluidez adecuada en la impresión, pues se obtuvo una geometría sólida y firme entre capas, tal y como se observa en la Figura 2, lo que la hace prometedora como material de impresión.

La Figura 3 muestra una impresión en forma de cráneo, donde se aprecian todos los detalles de la figura, con lo que se puede concluir que los parámetros de impresión y la textura del material son los adecuados para el producto.

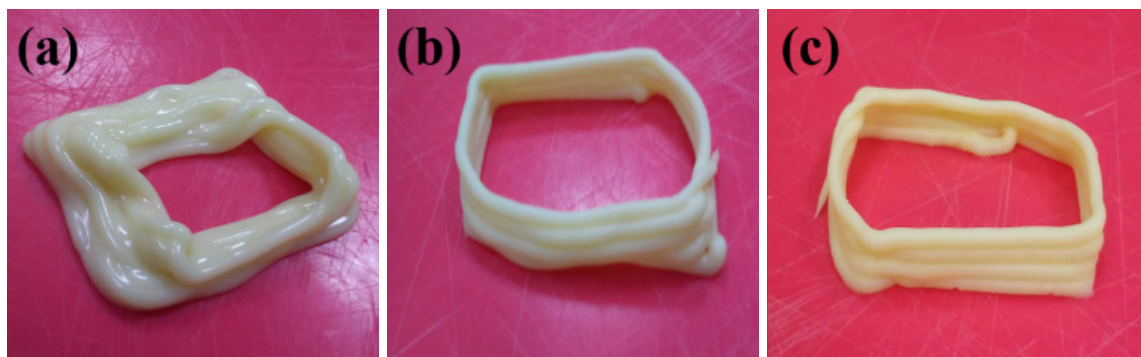


Figura 1. Mezcla de 10 g queso en polvo con (a) 5 gr, (b) 4 g y (c) 3,5 g de agua. Fuente: elaboración propia.

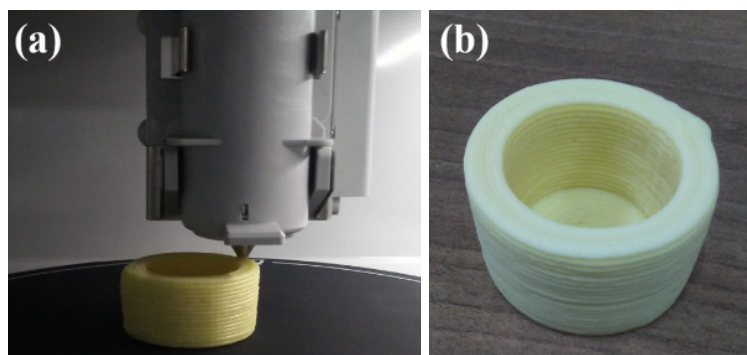


Figura 2. Cilindro de queso impreso en la impresora 3D Foodini (a) durante el proceso de impresión y (b) después de terminada la impresión. Fuente: elaboración propia.



Figura 3. Cráneo de queso 3D a diferentes vistas (a) frontal, (b) lateral derecho y (c) lateral izquierdo. Fuente: elaboración propia.

Ensayos reológicos

Para determinar el comportamiento del material dentro de la región viscoelástica, se realiza un barrido de deformación entre 0,2 y 11 %, tal y como se muestra en la Figura 4, que presenta rompimiento de la estructura a un porcentaje de esfuerzo de deformación de aproximadamente 0,17 %, ya que es el punto máximo que alcanza la gráfica. El módulo de pérdida (G'') se encuentra por debajo del módulo de almacenamiento (G'), lo cual indica que, al realizar un esfuerzo de deformación sobre la muestra, el comportamiento tiende a ser elástico, lo que manifiesta una naturaleza sólida de la muestra.

La Figura 5 muestra el barrido de frecuencias desde 10 s^{-1} a 1 s^{-1} , para la prueba se estableció como variable constante un esfuerzo de

deformación de 0,15 %. Se observa que la muestra presenta un comportamiento elástico debido a que el módulo de almacenamiento (G') se encuentra por encima del módulo de pérdida (G''), con un ángulo de fases constante de aproximadamente 20° , el cual no presenta un cambio significativo a lo largo del barrido de frecuencia, lo que indica que el material muestra un comportamiento sólido, tanto en altas como en bajas frecuencias.

Análisis nutricional

La Tabla 2 presenta la composición nutricional del queso para aplicaciones 3D, se puede observar un producto bajo en grasa y con alto contenido de proteína, donde se obtuvieron valores aproximados de 20 %, similares a los valores proteicos también reportados por Tarazona-Díaz

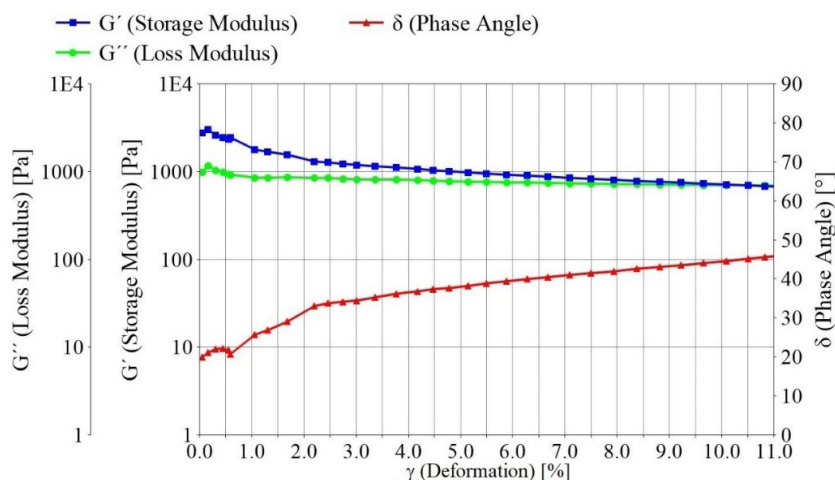


Figura 4. Barrido de amplitud o esfuerzo de deformación de la mora con açaí. Modo CD, τ 0,2–11 %, f 1 s^{-1} , T : 25°C y 40 puntos con un tiempo de activación de 10 segundos. Fuente: elaboración propia.

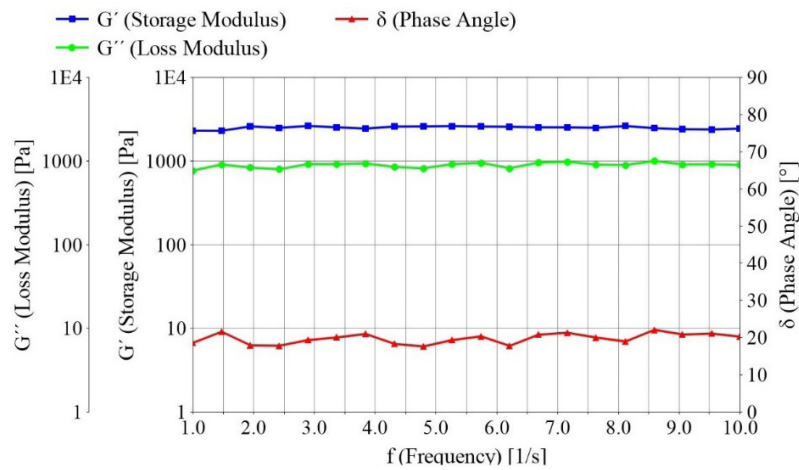


Figura 5. Barrido de frecuencia en la zona viscoelástica del queso. Modo CD, rango de frecuencia 10 s^{-1} – 1 s^{-1} , parámetro de deformación fijo 0,15 %, $T:25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 20 puntos con un tiempo de activación de 10 segundos. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Composición del queso para impresión 3D

Nutrition Facts/Información Nutricional			
Size for portion/Tamaño de la Porción: 4 cucharaditas (20g)			
Portions per Container/Porciones por envase 10			
Amount Per Serving/Cantidades por Porción			
Calories/Calorías 70		Calories from Fat/Calorías de la Grasa 0	
% Daily Value*/% Valor Diario*			
Total Fat/Grasa Total 0g			0 %
Saturated Fat/Grasa Saturada 0g			0 %
Trans Fat/Grasa Trans 0g			
Cholesterol/Colesterol 15mg			5 %
Sodium/Sodio 520mg			22 %
Total Carbohydrate/Carbohidrato Total 13g			4 %
Dietary Fiber/Fibra Dietaria 0g			0 %
Sugars/Azúcares 3g			
Protein/Proteína 4g			8 %
Vitamin A/Vitamina A 2%		Vitamin C/Vitamina C 0%	
Calcium/Calcio 15%		Iron/Hierro 0%	
*Percent Daily Values are based on a 2000 calorie diet./Your daily values may be higher or lower depending on your calorie needs:			
*Los porcentajes de Valores Diarios están basados en una dieta de 2000 calorías.Sus Valores Diarios pueden ser mayores o menores dependiendo de sus necesidades calóricas:			
	Calories/Calorías	2000	2500
Fat Total/Grasa Total	Less then/Menos de	65 g	80 g
Sat. Fat/Grasa Saturada	Less then/Menos de	20 g	25 g
Cholesterol/Colesterol	Less then/Menos de	300 mg	300 mg
Sodium/Sodio	Less then/Menos de	2400 mg	2400 mg
Total Carbohydrate/Carbohidrato Total		300 g	375 g
Dietary Fiber/Fibra Dietaria		25 g	30 g
Calories per gram/Calorías por gramo:			
Fat/Grasa 9	Carbohydrate/Carbohidrato 4	Protein/Proteína 4	

Fuente: elaboración propia.

Sistema II. Mora-açai

(2018). Es importante resaltar que las proteínas presentes son principalmente caseínas de alto valor biológico y nutricional (O'Brien; O'Connor; O'Callaghan; Dobson, 2004).

Se preparó una mezcla de mora con 5 % de açai, con el objetivo de darle un valor agregado al uso del açai como alimento innovador por presentar propiedades antioxidantes y reforzar el sistema inmunológico.

Para evaluar la textura del producto, se hidrataron 10 g de la mezcla con 4 g de agua, donde se observa una baja resistencia estructural al realizar el proceso de extrusión con la jeringa, tal como se observa en la Figura 6.



Figura 6. Estructura de mora con açaí, realizada mediante la extrusión con una jeringa cargada con una mezcla homogénea de 10 g del producto en polvo e hidratada con 4 g de agua. Fuente: elaboración propia.

Al no obtener una consistencia deseada, se adiciona 20 % de almidón ALM MOD BS25 UTEX SR a la mezcla, para mejorar la resistencia del material, y se hidrata con 7 g de agua. La Figura 7 muestra cómo aumenta favorablemente la resistencia estructural del material alimenticio al ser extruido mediante la jeringa.



Figura 7. 20 % de almidón ALM MOD BS25 UTEX SR en la mezcla de mora con açaí e hidratada con 7 g de H₂O. Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se evalúa la imprimibilidad de la mezcla al preparar 40 g del producto y cargarlo al cartucho de la impresora Foodini. La Figura 8 muestra claramente cómo se obtiene

una estructura con altura bien definida y con muy buena estabilidad para soportar la carga ejercida en las primeras capas impresas, además de no mostrar una deformación en la estructura impresa.

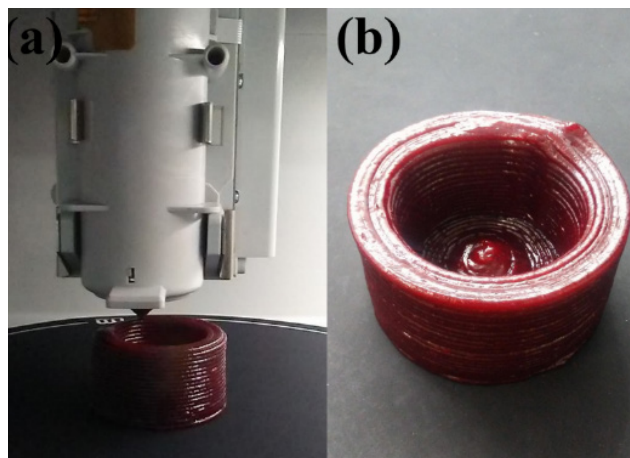


Figura 8. Impresión 3D de la mora con açaí (a) durante el proceso de impresión y (b) después de terminada la impresión. Fuente: elaboración propia.

Ensayos reológicos

La Figura 9 representa los registros obtenidos durante la prueba de barrido de amplitud para la muestra de mora con açaí. Este se llevó a cabo realizando un esfuerzo de deformación inicial de 0,2 % hasta alcanzar una deformación del 20 %, donde se estableció como variable fija una frecuencia de 1 s⁻¹ con un tiempo de activación de 10 segundos, la prueba se realizó a temperatura ambiente con un registro de 40 puntos. Se observa que el módulo de almacenamiento (G') se ubica por encima del módulo de pérdida (G''), lo que significa que, al realizar un esfuerzo de deformación sobre la muestra, el comportamiento tiende a ser viscoso, manifestando una naturaleza sólida de la muestra. El material alimenticio alcanza a destruirse al ser sometido a una deformación de aproximadamente de 1,043 %. A partir de este punto, los módulos comienzan a descender en su magnitud, mientras que el ángulo en dicha deformación aumenta, confirmando de esta manera el rompimiento de la estructura.

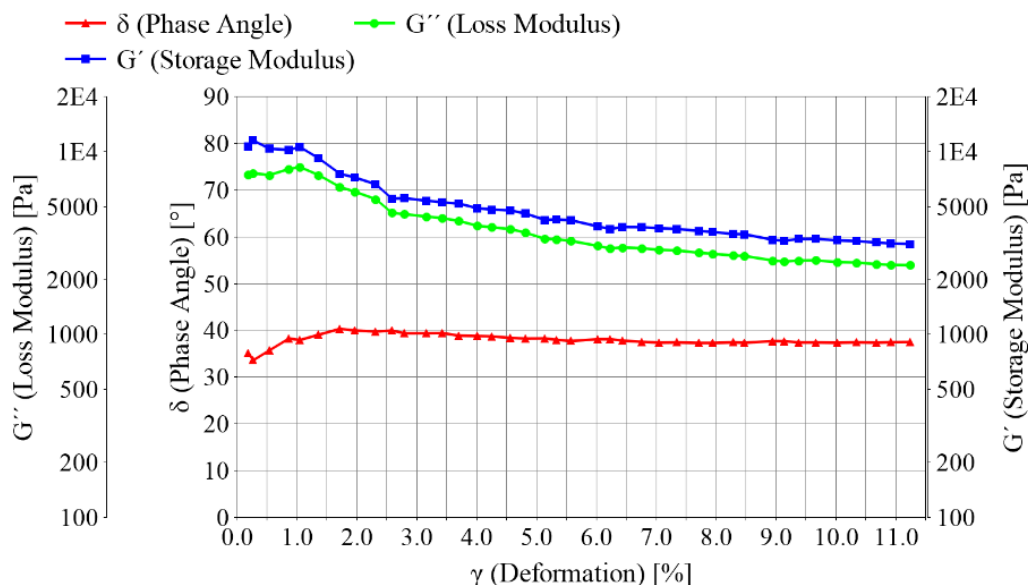


Figura 9. Barrido de amplitud o esfuerzo de deformación de la mora con açaf. Modo CD, τ 0,2–11 %, f 1 s^{-1} , T :25 °C y 40 puntos con un tiempo de activación de 10 segundos. Fuente: elaboración propia.

La Figura 10 muestra el barrido de frecuencias desde 10 s^{-1} a 1 s^{-1} , para la prueba se estableció como variable constante un esfuerzo de deformación de 0,9 % con 20 puntos de registro y 10 segundos activación de la muestra. Se observa

que esta presenta un comportamiento elástico debido a que el módulo de almacenamiento (G') se encuentra por encima del módulo de pérdida (G''). El ángulo inferior a 40° de fase no presenta un cambio significativo a lo largo del barrido de

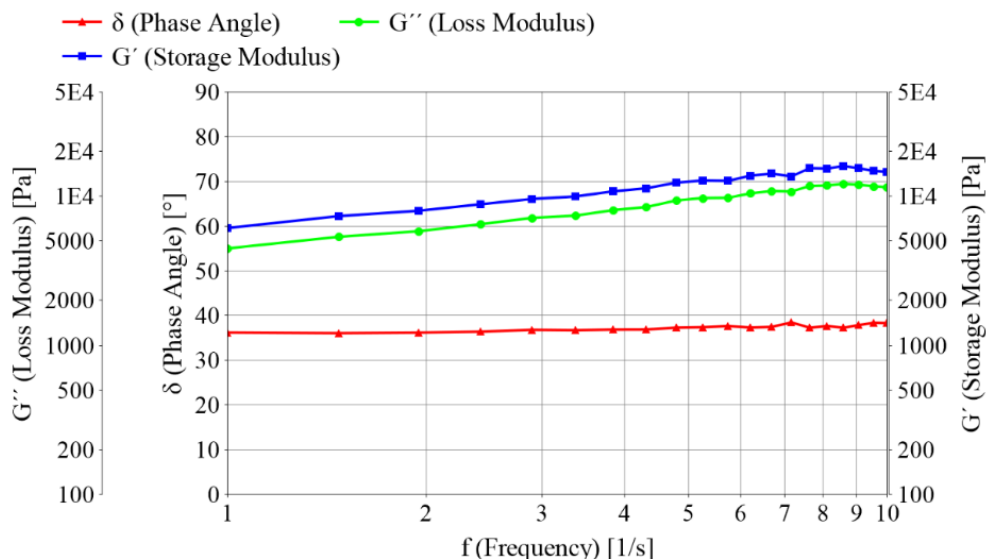


Figura 10. Barrido de frecuencia en la zona viscoelástica de la mora con açaf. Modo CD, rango de frecuencia 10 s^{-1} –1 s^{-1} , parámetro de deformación fijo 0,9 %, T :25 °C y 20 puntos con un tiempo de activación de 10 segundos. Fuente: elaboración propia.

frecuencia, lo que indica que el material muestra un comportamiento sólido tanto en altas como en bajas frecuencias.

Análisis nutricional

La Tabla 3 presenta la composición nutricional de la mora con 5 % de açaí para aplicaciones 3D, la cual presenta un aporte considerable de vitamina C, donde se obtuvieron valores de un 15 % de la porción diaria recomendada.

Sistema III. Galleta

Para la obtención de una galleta nutritiva, fue necesario desarrollar una formulación del producto tal y como se muestra en la Tabla 4.

Posteriormente, se desarrolló y formuló el edulcorante repostero a partir de eritritol, maltodextrina, estevia y fosfato tricálcico para incluirlo en la formulación de la galleta.

Para que el nivel de dulzor del endulzante repostero fuera similar al endulzante comercial, fue necesario evaluar la formulación con diferentes porcentajes de estevia, desde 0,01 % a 1 % hasta alcanzar el nivel de dulzor requerido mediante un análisis sensorial realizado al diluir 10 % del producto en agua.

Al ajustar el nivel de dulzor en la formulación del endulzante repostero, se procede a evaluar la textura del material con diferentes cantidades de agua. Se prepararon 10 g de la formulación de la galleta y se mezclaron homogéneamente con 5 g de agua, al realizar el proceso de extrusión con la jeringa, se logra observar que las capas depositadas una sobre otra, no se encuentran muy bien definidas debido a la textura semilíquida, por lo que el material no presenta la suficiente resistencia estructural, tal como se muestra en la Figura 11 (a), por lo cual se procede a disminuir la cantidad de agua a 3 g. Al realizar

Tabla 3. Composición de la mora con 5 % de açaí para impresión 3D

Nutrition Facts/Información Nutricional			
Size for portion/Tamaño de la Porción: 4 cucharaditas (20g)			
Portions per Container/Porciones por envase 10			
Amount Per Serving/Cantidades por Porción			
Calories/Calorías 70		Calories from Fat/Calorías de la Grasa 0	
% Daily Value*%/Valor Diario*			
Total Fat/Grasa Total 0g		0	%
Saturated Fat/Grasa Saturada 0g		0	%
Trans Fat/Grasa Trans 0g			
Cholesterol/Colesterol 0mg		0	%
Sodium/Sodio 60mg		3	%
Total Carbohydrate/Carbohidrato Total 19g		6	%
Dietary Fiber/Fibra Dietaria <1 g		0	%
Sugars/Azúcares 2g			
Protein/Proteína 0g		0	%
Vitamin A/Vitamina A 0%		Vitamin C/Vitamina C 15%	
Calcium/Calcio 0%		Iron/Hierro 0%	
*Percent Daily Values are based on a 2000 calorie diet./Your daily values may be higher or lower depending on your calorie needs:			
*Los porcentajes de Valores Diarios están basados en una dieta de 2000 calorías.Sus Valores Diarios pueden ser mayores o menores dependiendo de sus necesidades calóricas:			
	Calories/Calorías	2000	2500
Fat Total/Grasa Total	Less then/Menos de	65 g	80 g
Sat. Fat/Grasa Saturada	Less then/Menos de	20 g	25 g
Cholesterol/Colesterol	Less then/Menos de	300 mg	300 mg
Sodium/Sodio	Less then/Menos de	2400 mg	2400 mg
Total Carbohydrate/Carbohidrato Total		300 g	375 g
Dietary Fiber/Fibra Dietaria		25 g	30 g
Calories per gram/Calorías por gramo:			
Fat/Grasa	9	Carbohydrate/Carbohidrato	4
		Protein/Proteína	4

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. *Formulación de la galleta*

Ingrediente	Componente
GVP 80	Confidencial
Endulzante repostero	Confidencial
WPC 80	Confidencial
Almidón (fécula)	Confidencial
Harina de trigo	Confidencial
Salvado de trigo	Confidencial
Polvo de hornear	Confidencial
Lecitina de soya	Confidencial
Hierro	Confidencial
Zinc	Confidencial
Probióticos	Confidencial

Fuente: elaboración propia.

el mismo proceso de extrusión con la jeringa, se puede apreciar en la Figura 11 (b) una estructura mucho más sólida y estable.

La Figura 12 muestra la galleta durante y después del proceso de impresión, para lo que fueron necesarios 40 gramos de la galleta en polvo y 12 gramos de agua, hasta obtener una mezcla totalmente homogénea. Se logra observar una estructura 3D en forma de flor muy bien definida y estructuralmente estable.

La impresión 3D posteriormente fue sometida a un proceso de horneado a una temperatura de 130 °C durante 18 min. Durante dicho proceso el diseño original no se conserva, tal y como se observa en la Figura 13, por lo cual se deben realizar ajustes en la formulación.

Al evaluar el sabor de la galleta, se logra identificar que se encuentra muy simple, por lo cual se debe aumentar el porcentaje de endulzante en la formulación, además la galleta no presenta una consistencia o textura crocante. Sin embargo, se observa una buena formación de la miga (Figura 14).

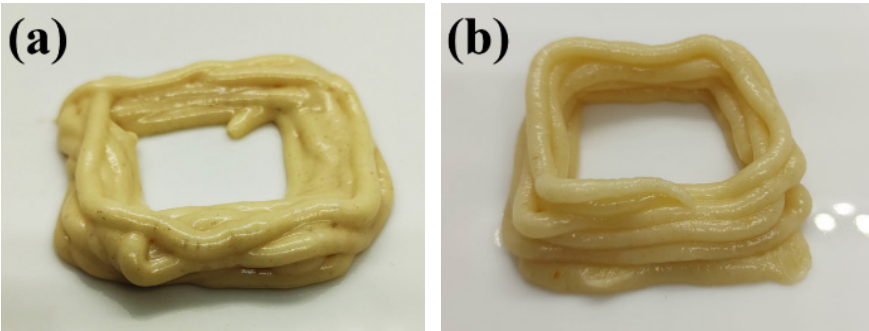


Figura 11. *Galleta en polvo hidratada a diferentes cantidades de agua (a) 5g y (b) 3 g. Fuente: elaboración propia.*

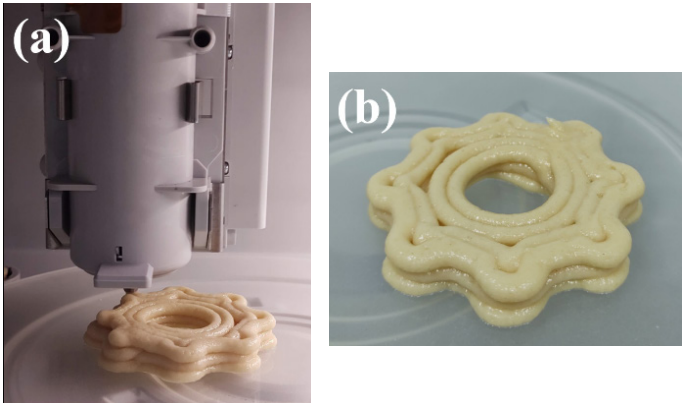


Figura 12. *Impresión de galleta en forma de flor (a) durante y (b) después del proceso de impresión 3D con equipo Foodini. Fuente: elaboración propia.*



Figura 13. Galleta después del proceso de horneado a 130 °C/18 min. Fuente: elaboración propia.



Figura 14. Vista transversal de la galleta, después del proceso de horneado a 130 °C/18 min. Fuente: elaboración propia.

La Tabla 5 presenta un ajuste en la formulación para la obtención de la galleta, donde se aumentó el porcentaje de endulzante repostero debido a que el dulzor del producto estaba un poco bajo, además se incorporó harina de avena.

Debido a que durante la experimentación y evaluación de la textura de la galleta se logró observar que el material alimenticio en el proceso de impresión presenta demasiada fluidez al emplear 3 g de agua por cada 10 g de galleta en polvo, se disminuyó dicha cantidad de agua a 2,5 gramos para reducir un poco la fluidez durante el proceso de impresión y mejorar la estabilidad estructural. (Figura 15).

La Figura 16 muestra la vista frontal del material impreso, donde se pueden apreciar claramente las capas de material alimenticio que fueron depositadas una sobre otra mediante el proceso de adición por impresión 3D. Se logra observar una estructura completamente estable sin ningún tipo de deformación.

Para la impresión de las dos figuras 3D fueron necesarios 70 g de galleta en polvo y 17,5 g de agua, posteriormente el material alimenticio se mezcló manualmente hasta obtener una consistencia bien homogénea y se cargó en el cartucho de acero inoxidable de la impresora Foodini, empleando una boquilla de diámetro de 4 mm.

Tabla 5. Formulación de la galleta

Ingrediente	Componente
GVP 80B	Confidencial
Endulzante repostero	Confidencial
WPC 80	Confidencial
Harina de avena	Confidencial
Harina de trigo	Confidencial
Polvo de hornear	Confidencial
Lecitina de soya	Confidencial
Hierro	Confidencial
Zinc	Confidencial
Probióticos	Confidencial

Fuente: elaboración propia.



Figura 15. Galleta hidratada con 2,5 g de agua por cada 10 g del producto en polvo. Fuente: elaboración propia.

La Figura 17 muestra las geometrías 3D después del proceso de horneado a 130 °C durante 18 min. Se observa que las galletas conservan el diseño después del proceso de horneo, mejora favorablemente el sabor y el dulzor, además de presentar una textura mucho más crocante.

Ensayos reológicos

La Figura 18 presenta los registros de la prueba reológica del barrido de amplitud para la muestra de aguacate, el barrido se realizó desde un esfuerzo de deformación de 0,1 % a 10 % con una frecuencia constante de 1 s⁻¹ y 10 segundos de activación de la muestra. Gráficamente se observa un ligero rompimiento de la muestra al someterla a un esfuerzo de deformación de 0,7 %, donde posteriormente el módulo elástico (G') tiende a disminuir hasta casi solaparse con el módulo viscoso (G''), lo cual representa que el material tiene a comportarse como un gel.

La Figura 19 muestra los registros del barrido de frecuencia desde 10 s⁻¹ a 1 s⁻¹ con un esfuerzo de deformación constante o variable fija de 0,6 % para garantizar el análisis en la región viscoelástica del material.

La muestra en estudio es predominantemente elástica desde altas hasta bajas frecuencias según el módulo elástico G' . El ángulo de fases



Figura 16. Vista frontal de la impresión 3D de la galleta. Fuente: elaboración propia.



Figura 17. Vista transversal de la galleta después del proceso de horneo a una temperatura de 130 °C por un tiempo de 18 min. Fuente: elaboración propia.

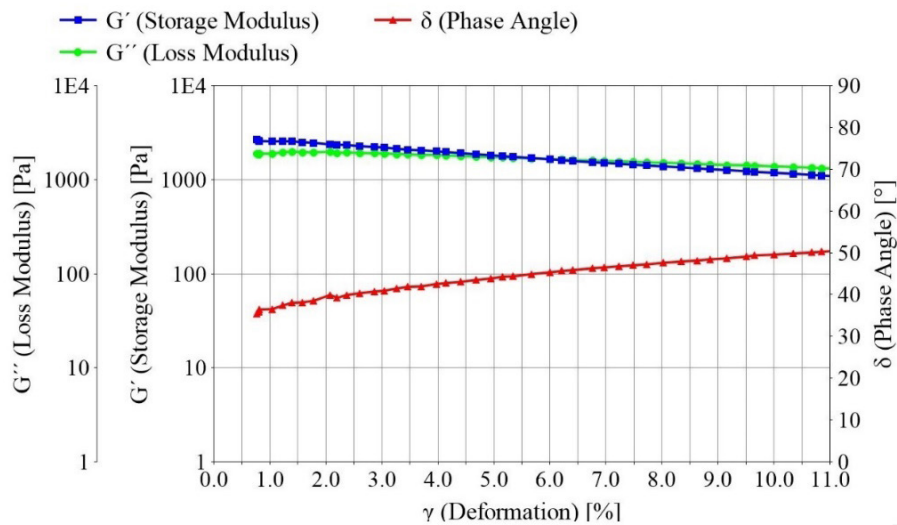


Figura 18. Barrido de amplitud o esfuerzo de deformación de la galleta. Modo CD, τ 0,2–11,0 %, f 1 s^{-1} , T :25 °C y 40 puntos con un tiempo de activación de 10 segundos. Fuente: elaboración propia.

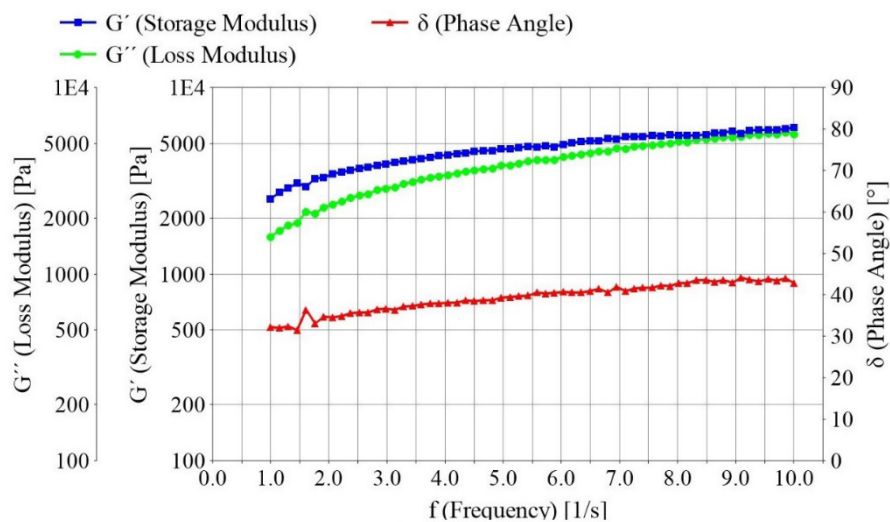


Figura 19. Barrido de frecuencia en la zona viscoelástica de la galleta. Modo CD, rango de frecuencia 10 s^{-1} –1 s^{-1} , parámetro de deformación fijo 0,7 %, T :25 °C y 60 puntos con un tiempo de activación de 10 segundos. Fuente: elaboración propia.

en altas frecuencias es de aproximadamente 45°, lo que lo hace que el material a dicha frecuencia se comporte como un sólido, mientras que a bajas frecuencias el ángulo disminuye hasta 40°, haciendo que el material en reposo durante el proceso de impresión sea mucho más sólido.

Análisis nutricional

La Tabla 6 presenta la composición nutricional de la galleta para aplicaciones 3D, donde se puede observar un producto bajo en grasa, con un alto contenido de minerales como lo son el

hierro y el calcio, además de presentar un aporte considerable de calorías con bajo contenido de azúcar y un alto contenido proteico.

Análisis sensorial

Los resultados obtenidos durante las pruebas sensoriales, tal y como se muestra en la Figura 20, muestran una buena aceptación del panel sensorial, el cual evidencia aceptación aproximada del 70 %. Los mejores resultados se obtuvieron con el desarrollo de la galleta nutricional, que alcanzó valores promedios del

Tabla 6. Composición del queso para impresión 3D

Nutrition Facts/Información Nutricional			
Size for portion/Tamaño de la Porción: 4 cucharaditas (20g)			
Portions per Container/Porciones por envase 10			
Amount Per Serving/Cantidades por Porción			
Calories/Calorías 90		Calories from Fat/Calorías de la Grasa 30	
		% Daily Value*/% Valor Diario*	
Total Fat/Grasa Total	3.5g	5	%
Saturated Fat/Grasa Saturada	2g	10	%
Trans Fat/Grasa Trans	0g		
Cholesterol/Colesterol	<5mg	0	%
Sodium/Sodio	80mg	3	%
Total Carbohydrate/Carbohidrato Total	11g	4	%
Dietary Fiber/Fibra Dietaria	2g	8	%
Sugars/Azúcares	1g		
Protein/Proteína	4g	8	%
Vitamin A/Vitamina A 0%		Vitamin C/Vitamina C 0%	
Calcium/Calcio 4%		Iron/Hierro 6%	
*Percent Daily Values are based on a 2000 calorie diet./Your daily values may be higher or lower depending on your calorie needs:			
*Los porcentajes de Valores Diarios están basados en una dieta de 2000 calorías.Sus Valores Diarios pueden ser mayores o menores dependiendo de sus necesidades calóricas:			
	Calories/Calorías	2000	2500
Fat Total/Grasa Total	Less then/Menos de	65 g	80 g
Sat. Fat/Grasa Saturada	Less then/Menos de	20 g	25 g
Cholesterol/Colesterol	Less then/Menos de	300 mg	300 mg
Sodium/Sodio	Less then/Menos de	2400 mg	2400 mg
Total Carbohydrate/Carbohidrato Total		300 g	375 g
Dietary Fiber/Fibra Dietaria		25 g	30 g
Calories per gram/Calorías por gramo:			
Fat/Grasa	9	Carbohydrate/Carbohidrato	4
		Protein/Proteína	4

Fuente: elaboración propia.

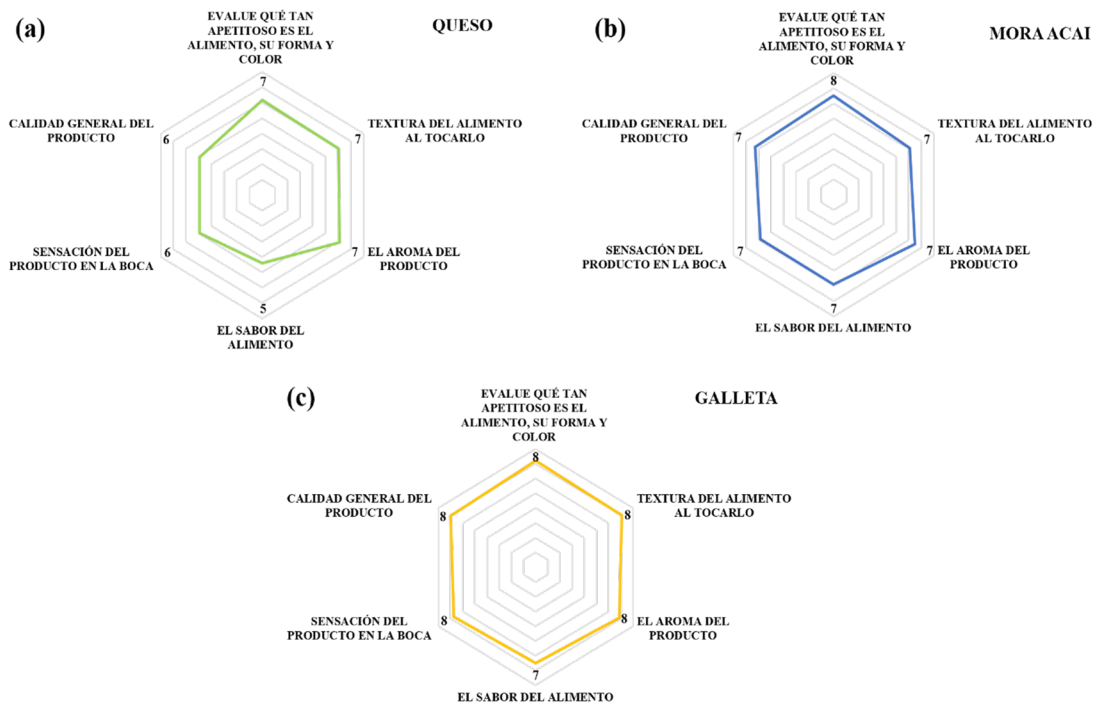


Figura 20. Evaluación sensorial de (a) queso, (b) mora-acaí y (c) galleta. Fuente: elaboración propia.

80 % de aceptación. Con respecto a la variable del sabor, el panel sensorial para el producto de queso presento una aceptación media, a diferencia de la mora con açaí y la galleta, los cuales presentaron una aceptación del 70 %, aproximadamente.

Conclusiones

Se desarrollaron productos alimenticios con alto potencial de aplicación tecnológica de impresión 3D. El queso presentó bajo contenido de grasa y alto contenido de proteínas, lo que hace que sea un producto alimenticio nutricional, además de mostrar una buena aceptación entre los consumidores para potenciales aplicaciones en impresiones 3D de alimentos.

La aplicación de la escala hedónica facial de tres puntos, con identificación de género, puede ser un instrumento útil para ayudar a la identificación de las preferencias y rechazos de alimentos.

Las galletas diseñadas para la aplicación de 3D *printing food* presentaron una buena calidad del producto a nivel general, nutricional y sensorial, con cantidades importantes de carbohidratos, fibra, minerales (hierro y calcio), y bajo contenido de grasa y azúcar.

Referencias

- Bitfab (2019). *Impresoras 3D de comida*. Recuperado de <https://bitfab.io/es/blog/impresoras-3d-comida/>
- Cohen, D.; Lipton, J.; Cutler, M.; Coulter, D.; Vesco, A.; Lipson, H. (2009). Hydrocolloid printing: a novel platform for customized food production. *20th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX.
- Godoi, F. C.; Prakash, S.; Bhandari, B. R. (2016). 3D printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025>
- Horvath, J. A. (2014). Brief history of 3D printing. En *Mastering 3D Printing* (pp. 3-10). Berkeley, CA. Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-0025-4_1
- O'Brien, N. M.; O'Connor, T. P.; O'Callaghan, J.; Dobson, A. D. W. (2004). Toxins in Cheese. En P. F. Fox; P. L. H. McSweeney; T. M. Cogan; T. P. Guinee (Eds.), *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology* (pp. 561-571). Cambridge, MA: Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S1874-558X\(04\)80082-4](https://doi.org/10.1016/S1874-558X(04)80082-4)
- Pérez, B.; Nykvist, H.; Brøgger, A. F.; Larsen, M. B.; Falkeborg, M. F. (2019). Impact of macronutrients printability and 3D-printer parameters on 3D-food printing: A review. *Food Chemistry*, 287, 249-257. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.090>
- Piyush, R. K.; Kumar, R. (2020). 3D printing of food materials: A state of art review and future applications. *Materials Today: Proceedings*, 33(Parte 3), 1463-1467. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.005>
- Tarazona-Díaz, M. (2018). Nutritional, microbiological and sensorial characterization of fresh cheese. *Nutrición Clínica y Dietética Hospitalaria*, 38(3), 74-79. <https://doi.org/10.12873/383tarazona>
- Zhu, S.; Stieger, M. A.; van der Goot, A. J.; Schutyser, M. A. I. (2019). Extrusion-based 3D printing of food pastes: Correlating rheological properties with printing behaviour. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 58, 102214. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102214>