



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA APLICACIÓN DE LA IMPRESIÓN 3D EN EL DISEÑO DE ALIMENTOS. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Autor: Lara García Vidigal

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Susana Ortiz Marcos

Madrid

Junio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Análisis Técnico-Económico de la Aplicación de la Impresión 3D en el Diseño de
Alimentos. Caracterización de la Materia Prima

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Lara García Vidigal

Fecha: 30/06/2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 30/06/2025

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han hecho posible la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

En primer lugar, quiero agradecer de manera especial a mis tutores, Mariano Jiménez y Susana Ortiz, por su dedicación, orientación y apoyo constante a lo largo de todas las fases del proyecto. Su experiencia, sus valiosas sugerencias técnicas y su implicación han sido fundamentales para superar los retos que han surgido durante el desarrollo de esta investigación.

Asimismo, extiendo mi gratitud a mi universidad, por brindarme los recursos, el entorno académico y las herramientas necesarias para llevar a cabo este trabajo, así como por fomentar un espacio de aprendizaje que combina el rigor técnico con la innovación aplicada.

A todos los que, de una u otra forma, han contribuido al desarrollo de este proyecto, mi más sincero reconocimiento.

ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA APLICACIÓN DE LA IMPRESIÓN 3D EN EL DISEÑO DE ALIMENTOS: CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.

Autor: García Vidigal, Lara.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Co-Director: Ortiz Marcos, Susana.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Este trabajo desarrolla una caracterización técnico-experimental de diferentes materias primas comestibles, validando su viabilidad para impresión 3D mediante ensayos de extrusión y análisis reológico. Asimismo, se plantea un modelo económico que evalúa la rentabilidad de implementar esta tecnología en el mercado alimentario español, identificando tanto sus beneficios estratégicos como sus limitaciones actuales.

Palabras clave: Impresión 3D de alimentos, Fabricación aditiva, Reología alimentaria, Extrusión de materiales comestibles, Viabilidad económica.

1. Introducción

La fabricación aditiva ha revolucionado los procesos de diseño y producción en numerosos sectores, destacando por su capacidad de crear objetos tridimensionales con geometrías complejas, bajo demanda y con un óptimo aprovechamiento de los recursos [1]. En este contexto, la impresión 3D de alimentos emerge como una tecnología disruptiva que combina ingeniería, gastronomía y sostenibilidad, ofreciendo nuevas posibilidades para la personalización alimentaria, la revalorización de subproductos y la optimización de procesos [2]. El presente proyecto explora de forma experimental y estratégica la viabilidad técnica y económica de la impresión 3D aplicada al sector alimentario, con especial foco en su potencial para transformar la producción y el consumo de alimentos.

2. Definición del proyecto

El presente proyecto tiene como finalidad validar la impresión 3D de alimentos como una tecnología viable para transformar la producción de productos comestibles, permitiendo su fabricación de manera personalizada, eficiente y sostenible [2]. En un contexto marcado por la necesidad de optimizar recursos, reducir desperdicio y adaptar la alimentación a las demandas nutricionales individuales, esta tecnología se plantea como una solución innovadora de alto potencial. Para alcanzar este propósito, se han definido los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar técnicamente distintas materias primas alimentarias, como chocolate y matrices vegetales, analizando sus propiedades reológicas, térmicas y estructurales.
- Diseñar, modelar e imprimir con éxito prototipos de alimentos mediante la impresora FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer.
- Analizar la viabilidad técnico-económica de la tecnología en un escenario de aplicación realista.
- Desarrollar un análisis que identifique ventajas competitivas, limitaciones actuales y oportunidades de futuro.

Con este enfoque multidisciplinar, el proyecto busca no solo validar técnicamente los procesos de impresión 3D de alimentos, sino también aportar una visión aplicada sobre su viabilidad económica y su contribución a los retos alimentarios globales.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Para la fase experimental, se ha empleado la impresora FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer (véase Ilustración i), diseñada específicamente para la impresión de alimentos mediante extrusión de materiales de distinta viscosidad.



Ilustración i – Impresora FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer [4].

El flujo de trabajo ha integrado el diseño tridimensional de modelos alimentarios en el software CAD Solid Edge, la preparación de los archivos para impresión mediante Simplify3D, optimizando parámetros como temperatura, velocidad y altura de capa, y los ensayos reológicos y de extrusión para determinar el comportamiento de los materiales durante el proceso. Además, se han desarrollado formulaciones funcionales, especialmente en matrices vegetales deshidratadas, que garantizan estabilidad postimpresión [3].

A nivel económico, se ha diseñado un modelo de costes que incluye la inversión inicial en equipos y adaptaciones, los costes de materias primas y energía, los costes de operación y mantenimiento, el análisis de rentabilidad a partir del ROI y del payback, y simulaciones de escenarios de mercado en aplicaciones como alta gastronomía y producción semiindustrial.

4. Resultados

Los ensayos experimentales y el análisis económico-financiero realizados en este proyecto confirman de forma concluyente la viabilidad técnica, operativa y económica de la impresión 3D de alimentos en aplicaciones reales, con resultados cuantificables que avalan su potencial como tecnología disruptiva en el sector alimentario.

Desde el punto de vista técnico, se logró validar la impresión multicapa de alimentos utilizando tanto chocolate negro como chocolate blanco, demostrando la compatibilidad reológica entre ambos materiales y la posibilidad de obtener estructuras estables, precisas y sin delaminaciones (véase Ilustración ii). El control térmico específico, aplicado durante la extrusión, permitió optimizar la adherencia intermaterial y la definición geométrica de las piezas, consolidando así la impresión bicolor como una solución técnicamente robusta.

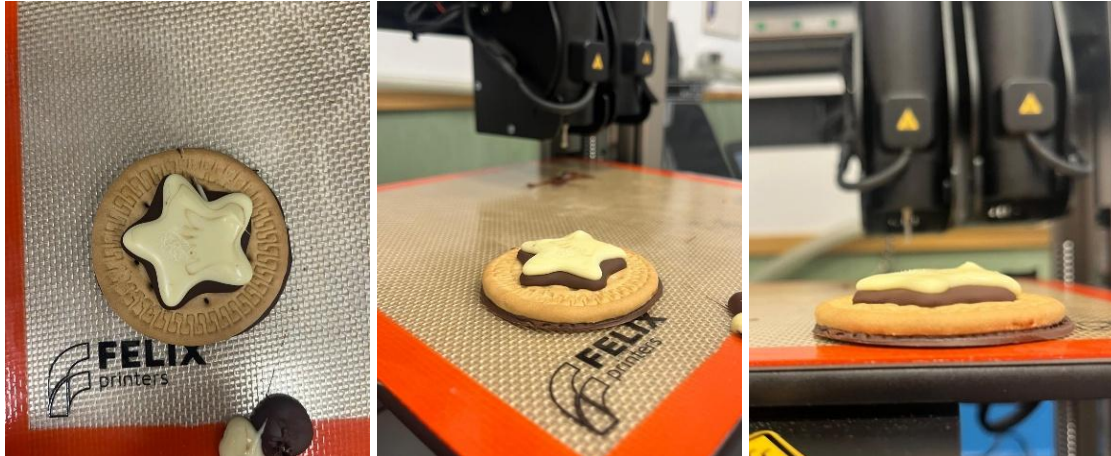


Ilustración ii – Impresión Multicapa con Chocolate Negro y Blanco.

Asimismo, la investigación con matrices vegetales deshidratadas, concretamente brócoli, zanahoria y lombarda en polvo, evidenció un comportamiento pseudoplástico adecuado para la extrusión, garantizando una fluidez controlada y una estabilidad estructural óptima durante el proceso de impresión (véase Ilustración iii).

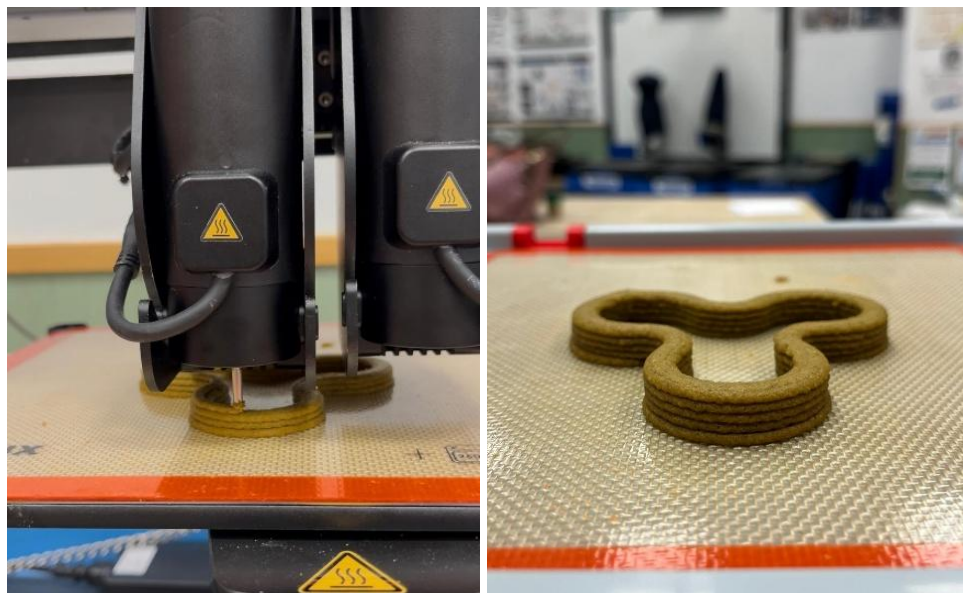


Ilustración iii – Impresión con Matriz Vegetal Realizada a Base de Brócoli.

Desde una perspectiva económica, los análisis de viabilidad realizados muestran que la impresión 3D de alimentos puede ser una tecnología rentable, especialmente en mercados orientados a productos de alto valor añadido.

Para evaluar esta rentabilidad, se ha estimado un coste unitario de producción de 3,22 € por unidad (véase Figura i), que incluye el preprocesado, postprocesado, materiales alimentarios e impresión.

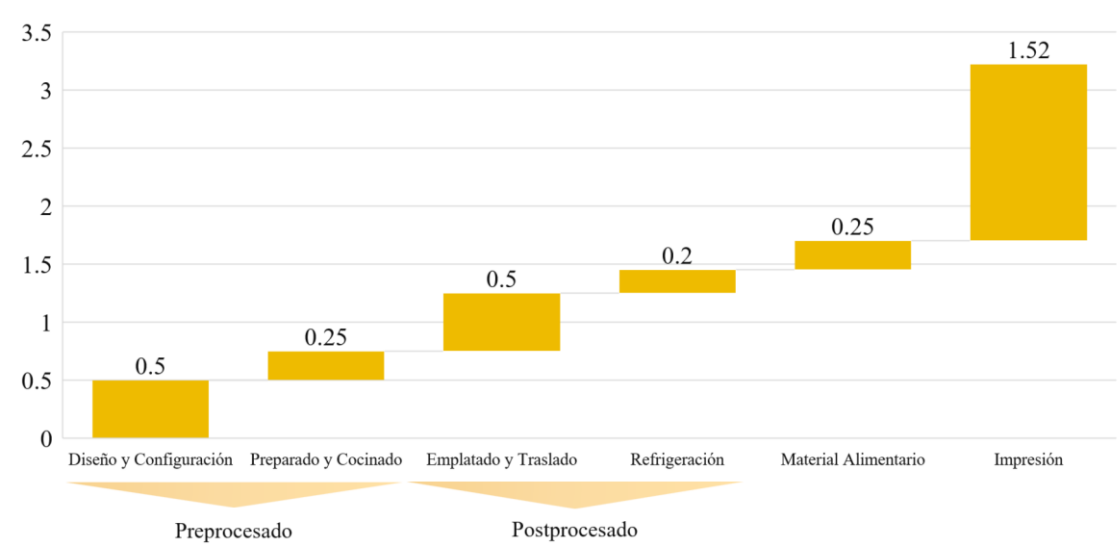


Figura i – Diagrama de Cascada Sintetizando los Costes Unitarios de Producción.

A partir de este análisis de costes, se han modelizado distintos escenarios de rentabilidad considerando diferentes precios de venta, manteniendo una producción constante de 10 unidades diarias. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Precio de venta (€)	Unidades/día	Ingresos anuales (€)	Beneficio neto anual (€)	ROI (%)	Payback (años)
5,00	10	14.400	5.126	23,08 %	2,28
5,50	10	15.840	6.566	35,38 %	1,78
6,00	10	17.280	8.006	47,69 %	1,46
6,50	10	18.720	9.446	60,00 %	1,24

Figura ii – Escenarios de Análisis de ROI y Payback según Precio de Venta.

Bajo escenarios conservadores de inversión y costes operativos, los resultados indican que la rentabilidad es moderada, con periodos de recuperación (payback) superiores a 2 años y retornos sobre la inversión (ROI) en torno al 20 %. Sin embargo, en aplicaciones donde es posible alcanzar precios de venta más elevados, los márgenes de beneficio aumentan significativamente, situando los paybacks por debajo de 1,5 años y los ROIs en el rango del 50 % al 60 %.

Estos resultados evidencian que la adopción de esta tecnología resulta especialmente atractiva en nichos de mercado donde la diferenciación, la exclusividad y la personalización aportan un valor percibido adicional al consumidor.

5. Conclusiones

Los resultados de este proyecto confirman que la impresión 3D de alimentos no es una tecnología a futuro, sino una realidad plenamente operativa con capacidad de transformar el sector alimentario en el presente. Su viabilidad técnica y económica, contrastada experimentalmente, demuestra que esta solución puede integrarse de forma efectiva en nichos de mercado donde la personalización, la exclusividad y el alto valor añadido constituyen ventajas competitivas clave.

Más allá de su rentabilidad en segmentos específicos, esta tecnología contribuye de manera directa a la sostenibilidad alimentaria, permitiendo optimizar el uso de materias primas, reducir el desperdicio en los procesos de producción y revalorizar subproductos, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En particular, se alinea con el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables), al fomentar modelos de fabricación eficientes y a demanda, y con el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), al impulsar soluciones tecnológicas avanzadas que promueven una industria más sostenible e inclusiva.

En definitiva, la impresión 3D de alimentos se posiciona como una herramienta estratégica para afrontar los retos de la alimentación moderna, combinando innovación, sostenibilidad y personalización en un mismo proceso tecnológico.

6. Referencias

- [1] Asociación Española de Normalización, «UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017 – Fabricación aditiva. Principios generales. Terminología», UNE (AENOR), Madrid, UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017, 2017.
- [2] S. Ford y M. Despeisse, «Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges», *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1573-1587, nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150.
- [3] P. Jantrawut *et al.*, «Rheological properties, printability and microstructure of buttermilk-mashed potatoes incorporated with chlorpheniramine maleate as a material for 3D food printing», *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 58, n.º 11, pp. 5796-5808, nov. 2023, doi: 10.1111/ijfs.16683.
- [4] «FELIX Food 1.6 - Switch Head 3D Printer», FELIX Food. [En línea]. Disponible en: <https://felixfood.nl/felix-food-1-6-switch-head>

TECHNICAL-ECONOMIC ANALYSIS OF THE APPLICATION OF 3D PRINTING IN FOOD DESIGN: RAW MATERIAL CHARACTERIZATION

Author: Garcia Vidigal, Lara.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Co-Supervisor: Ortiz Marcos, Susana.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

This work develops a technical-experimental characterization of different edible raw materials, validating their feasibility for 3D printing through extrusion tests and rheological analysis. In addition, an economic model is proposed to assess the profitability of implementing this technology in the Spanish food market, identifying both its strategic benefits and current limitations.

Keywords: 3D Food Printing, Additive Manufacturing, Food Rheology, Extrusion of Edible Materials, Economic Feasibility.

1. Introduction

Additive manufacturing has revolutionized design and production processes across numerous industries, standing out for its ability to create three-dimensional objects with complex geometries, on demand, and with optimal resource efficiency [1]. In this context, 3D food printing emerges as a disruptive technology that combines engineering, gastronomy, and sustainability, offering new possibilities for food personalization, by-product revalorization, and process optimization [2]. This project experimentally and strategically explores the technical and economic feasibility of applying 3D printing to the food sector, with particular focus on its potential to transform food production and consumption.

2. Project Definition

The aim of this project is to validate 3D food printing as a viable technology to transform the production of edible products, enabling their fabrication in a personalized, efficient, and sustainable manner [2]. In a context increasingly defined by the need to optimize resources, reduce waste, and adapt food to individual nutritional demands, this technology emerges as a high-potential, innovative solution. To achieve this goal, the following specific objectives have been established:

- Technically characterize various food-grade raw materials, such as chocolate and vegetable-based matrices, by analyzing their rheological, thermal, and structural properties.
- Design, model, and successfully print food prototypes using the FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer.
- Analyze the technical and economic feasibility of this technology within a realistic application scenario.
- Develop a strategic analysis to identify competitive advantages, current limitations, and future opportunities.

Through this multidisciplinary approach, the project aims not only to technically validate 3D food printing processes but also to provide an applied perspective on its economic viability and its potential contribution to addressing global food production challenges.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

For the experimental phase, the FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer was used (see Illustration i), a device specifically designed for food printing through the extrusion of materials with varying viscosities.



Illustration i – FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer [4].

The workflow integrated the three-dimensional design of food models using the CAD software Solid Edge, the preparation of printing files with Simplify3D by optimizing parameters such as temperature, extrusion speed, and layer height, as well as rheological and extrusion tests to determine the behavior of the materials during the printing process. Additionally, functional formulations were developed, particularly for dehydrated vegetable matrices, ensuring post-printing structural stability [3].

From an economic perspective, a cost model was designed that includes initial investments in equipment and adaptations, raw material and energy costs, operating and maintenance expenses, profitability analysis based on ROI and payback period, and market scenario simulations for applications such as haute cuisine and semi-industrial production.

4. Results

The experimental trials and the economic-financial analysis conducted in this project conclusively confirm the technical, operational, and economic feasibility of 3D food printing in real-world applications, with quantifiable results supporting its potential as a disruptive technology in the food sector.

From a technical standpoint, the successful validation of multilayer food printing using both dark and white chocolate demonstrated the rheological compatibility between the two materials and the feasibility of producing stable, precise structures without delamination (see Illustration ii). The application of specific thermal control during extrusion optimized intermaterial adhesion and the geometric definition of the printed products, thereby establishing bicolor printing as a technically robust solution.

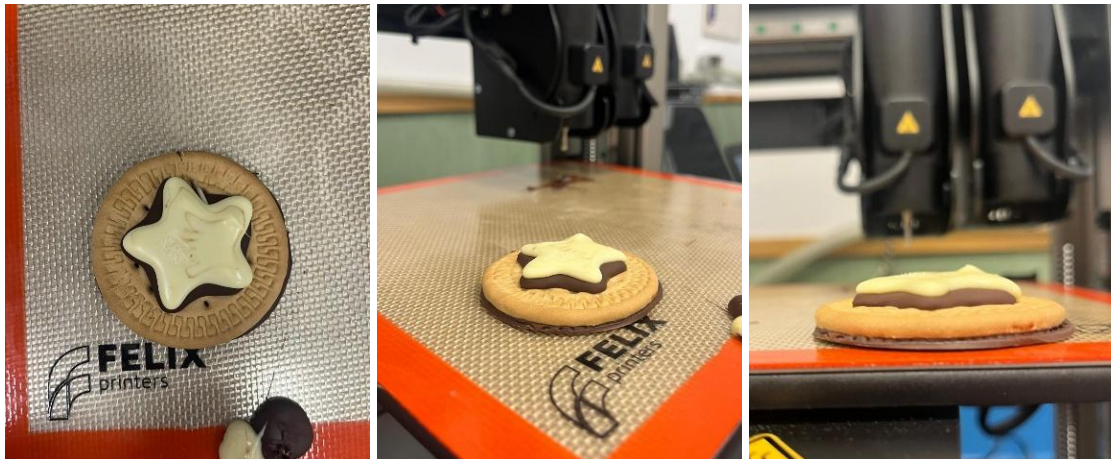


Illustration ii – Multilayer Printing with Dark and White Chocolate.

Additionally, the research involving dehydrated vegetable matrices—specifically broccoli, carrot, and red cabbage powders—demonstrated suitable pseudoplastic behavior for extrusion, ensuring controlled flow and optimal structural stability during the printing process (see Illustration iii).

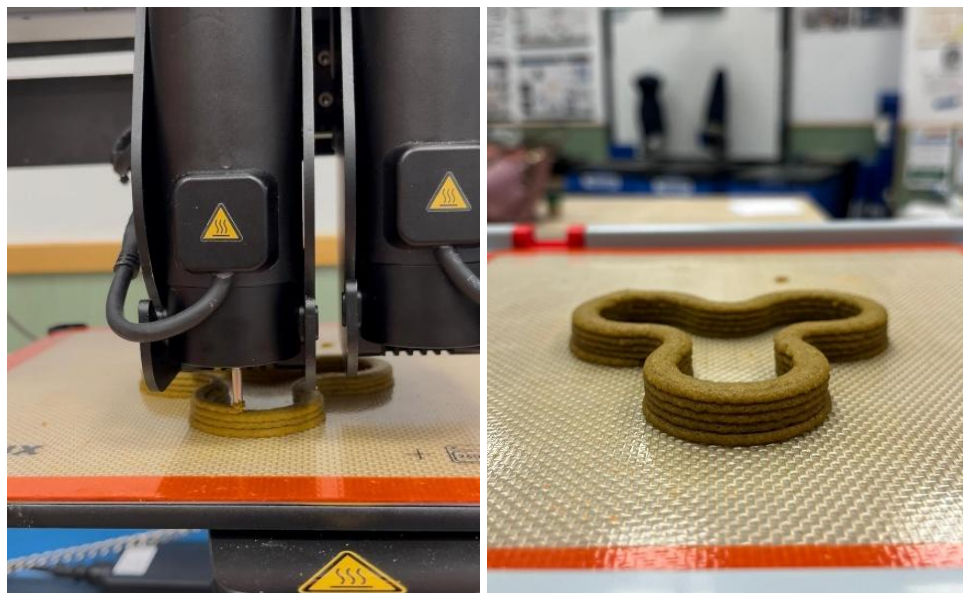


Illustration iii – Impresión con Matriz Vegetal Realizada a Base de Brócoli.

From an economic perspective, the viability analyses indicate that 3D food printing can be a profitable technology, particularly in markets focused on high value-added products.

To assess this profitability, the unit production cost has been estimated at €3.22 per unit (see Figure i), which includes preprocessing, postprocessing, food-grade materials, and printing.

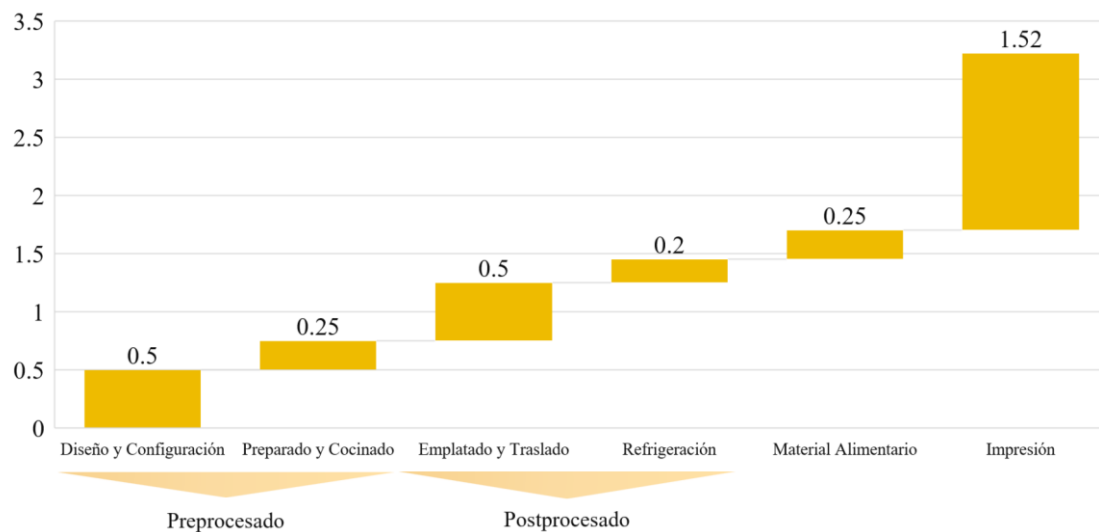


Figure i – Waterfall Diagram Summarizing Unit Production Costs.

Based on this cost analysis, different profitability scenarios were modeled by varying the selling price while maintaining a constant production of 10 units per day. The resulting figures are summarized in the following table:

Selling Price (€)	Units/day	Annual Revenue (€)	Net Annual Profit (€)	ROI (%)	Payback (years)
5.00	10	14,400	5,126	23.08 %	2.28
5.50	10	15,840	6,566	35.38 %	1.78
6.00	10	17,280	8,006	47.69 %	1.46
6.50	10	18,720	9,446	60.00 %	1.24

Figure ii – ROI and Payback Analysis Scenarios Based on Selling Price.

Under conservative investment and operational cost assumptions, the results indicate moderate profitability, with payback periods exceeding 2 years and returns on investment (ROI) around 20%. However, in applications where higher selling prices can be achieved, profit margins increase significantly, reducing the payback period to under 1.5 years and pushing ROIs into the 50%–60% range.

These findings highlight that the adoption of this technology is particularly attractive in niche markets where differentiation, exclusivity, and personalization deliver additional perceived value to consumers.

5. Conclusions

The results of this project confirm that 3D food printing is no longer a technology of the future, but a fully operational reality with the potential to transform the food sector today. Its technical and economic viability, demonstrated through experimental validation, shows

that this solution can be effectively integrated into niche markets where personalization, exclusivity, and high added value represent key competitive advantages.

Beyond its profitability in specific market segments, this technology directly contributes to food system sustainability by optimizing the use of raw materials, reducing waste in production processes, and enabling the revalorization of by-products, in alignment with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). In particular, it contributes to SDG 12 (Responsible Consumption and Production) by promoting efficient, on-demand manufacturing models, and to SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) by driving advanced technological solutions that foster a more sustainable and inclusive industrial framework.

In conclusion, 3D food printing positions itself as a strategic tool to address the challenges of modern food production, combining innovation, sustainability, and personalization within a single technological process.

6. Referencias

- [1] Asociación Española de Normalización, «UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017 – Fabricación aditiva. Principios generales. Terminología», UNE (AENOR), Madrid, UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017, 2017.
- [2] S. Ford y M. Despeisse, «Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges», *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1573-1587, nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150.
- [3] P. Jantrawut et al., «Rheological properties, printability and microstructure of buttermilk-mashed potatoes incorporated with chlorpheniramine maleate as a material for 3D food printing», *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 58, n.o 11, pp. 5796-5808, nov. 2023, doi: 10.1111/ijfs.16683.
- [4] «FELIX Food 1.6 - Switch Head 3D Printer», FELIX Food. [En línea]. Disponible en: <https://felixfood.nl/felix-food-1-6-switch-head>

Índice de la Memoria

Capítulo 1. Introducción y Planteamiento del Proyecto	10
1.1. Introducción al Proyecto.....	10
1.2. Motivación del Proyecto.....	10
1.3. Objetivos del Proyecto	11
1.4. Metodología y Planificación del Proyecto.....	12
1.4.1. Estudio del estado del arte	12
1.4.2. Caracterización de materias primas para impresión 3D	12
1.4.3. Diseño digital e impresión de productos alimentarios.....	12
1.4.4. Evaluación técnico-económica aplicada a un modelo de negocio.	12
1.4.5. Análisis estratégico de la tecnología	13
1.5. Recursos a Emplear	13
1.5.1. FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer	13
1.5.2. Solid Edge	14
1.5.3. Simplify3D	14
Capítulo 2. Estado de la Técnica	15
2.1. Técnicas de Fabricación Aditiva.....	15
2.1.1. Fotopolimerización en Cubeta.....	15
2.1.2. Extrusión de Materiales	16
2.1.3. Fusión en Lecho de Polvo	17
2.1.4. Inyección de Aglutinante	19
2.1.5. Chorro de Material.....	20
2.1.6. Laminado de Láminas	21
2.2. Aplicaciones de la Fabricación Aditiva	22
2.2.1. Sector Industrial y Prototipado	22
2.2.2. Construcción y Grandes Estructuras	23
2.2.3. Medicina y Odontología	24
2.2.4. Sector Aeroespacial y Defensa	25
2.2.5. Moda, Arquitectura y Diseño.....	26
2.2.6. Joyería.....	27
2.2.7. Alimentación y Gastronomía.....	28
2.3. Impacto Sostenible de la Fabricación Aditiva	30
2.4. Limitaciones de la Fabricación Aditiva	31
2.4.1. Limitaciones Técnicas	31

2.4.2.	Limitaciones Económicas y Regulatorias.....	31
2.5.	Comparativa de Técnicas de Fabricación Aditiva	32
<i>Capítulo 3. Fabricación Aditiva en Alimentación</i>		34
3.1.	Técnicas de Fabricación Aditiva en Alimentación	34
3.2.	Materias Primas Comestibles y Criterios de Aptitud para Impresión 3D	35
3.2.1.	Chocolate	35
3.2.1.1.	Diferencias Funcionales entre el Chocolate Negro y Blanco	36
3.2.1.2.	Polimorfismo Lipídico y Precristalización	36
3.2.1.3.	Comportamiento Reológico y su Impacto durante la Impresión	37
3.2.1.4.	Solidificación y Estabilidad Estructural Postimpresión	38
3.2.2.	Matrices Vegetales	39
3.2.2.1.	Composición y Características Funcionales	39
3.2.2.2.	Comportamiento Reológico y su Impacto durante la Impresión	40
3.2.2.3.	Solidificación y Estabilidad Estructural Postimpresión	41
3.2.3.	Geles de Frutas	42
3.2.3.1.	Composición y Características Funcionales	42
3.2.3.2.	Comportamiento Reológico y su Impacto durante la Impresión	43
3.2.3.3.	Solidificación y Estabilidad Estructural Postimpresión	44
3.2.4.	Carnes y Pescados	45
3.2.4.1.	Composición y Características Funcionales	45
3.2.4.2.	Comportamiento Reológico y su Impacto durante la Impresión	46
3.2.4.3.	Solidificación y Estabilidad Estructural Postimpresión	46
3.3.	Aplicaciones de la Fabricación Aditiva en Alimentación.....	47
3.3.1.	Gastronomía Creativa y Alta Cocina	47
3.3.2.	Automatización Industrial y Personalización Alimentaria	48
3.3.3.	Nutrición y Dietas Terapéuticas.....	49
3.3.4.	Revalorización de Subproductos	49
<i>Capítulo 4. Desarrollo Experimental</i>		51
4.1.	Modelado CAD	51
4.2.	Caracterización del Chocolate	52
4.2.1.	Evaluación del Comportamiento del Chocolate Negro durante la Impresión	52
4.2.1.1.	Ensayo 1: Calibración Estructural y Geométrica del Chocolate Negro	53
4.2.1.2.	Ensayo 2: Evaluación de la Temperatura y Velocidad de Extrusión en Piezas de Mayor Escala	55

4.2.1.3.	Ensayo 2: Optimización Térmica del Chocolate Negro y Análisis de su Comportamiento como Fluido Pseudoplástico.....	56
4.2.1.4.	Conclusiones de los Ensayos con Chocolate Negro en Impresión 3D ...	58
4.2.2.	Evaluación del Comportamiento del Chocolate Blanco durante la Impresión	59
4.2.2.1.	Ensayo: Calibración Estructural y Geométrica del Chocolate Blanco ...	60
4.2.3.	Impresión Multicapa con Chocolate Negro y Blanco	61
4.2.3.1.	Ensayo: Evaluación de Compatibilidad entre Chocolates Blanco y Negro y Aplicación de Técnicas de Enfriamiento Rápido	61
4.2.3.2.	Conclusiones de los Ensayos con Chocolate Blanco en Impresión 3D..	64
4.3.	Caracterización de la Zanahoria	65
4.3.1.	Evaluación del Comportamiento de la Zanahoria Cocida durante la Impresión	66
4.3.1.1.	Ensayo 1: Calibración Estructural y Geométrica de la Mezcla de Zanahoria Cocida.....	67
4.3.1.2.	Ensayo 2: Ajuste de Fluidez de la Mezcla de Zanahoria Cocida.....	69
4.3.1.3.	Conclusiones de los Ensayos con Zanahoria Cocida en Impresión 3D..	72
4.3.2.	Evaluación del Uso de la Zanahoria Deshidratada durante la Impresión...	73
4.3.2.1.	Deshidratación de la Zanahoria	74
4.3.2.2.	Ensayo: Influencia del Agar-Agar como Gelificante Térmico en la Extrusabilidad de Mezclas de Zanahoria Deshidratada para Impresión 3D.....	76
4.3.2.3.	Conclusiones Finales Sobre el Uso de la Zanahoria Deshidratada en Impresión	77
4.4.	Caracterización del Brócoli	78
4.4.1.	Evaluación del Uso del Brócoli Deshidratado durante la Impresión.....	79
4.4.1.1.	Deshidratación del Brócoli	80
4.4.1.2.	Ensayo 1: Evaluación Inicial de una Mezcla de Brócoli Deshidratado Enriquecida con Aceite de Oliva	80
4.4.1.3.	Ensayo 2: Evaluación de la Estabilidad Vertical en Piezas de Cinco Capas	84
4.4.1.4.	Conclusiones Finales Sobre el Uso del Brócoli Deshidratado en Impresión	87
4.5.	Caracterización de la Lombarda	88

4.5.1.	Evaluación del Uso de la Lombarda Deshidratada durante la Impresión ..	88
4.5.1.1.	Deshidratación de la Lombarda	89
4.5.1.2.	Ensayo: Evaluación Inicial de una Mezcla de Lombarda Deshidratada	89
4.5.1.3.	Conclusiones Finales Sobre el Uso de la Lombarda Deshidratada en Impresión	93
<i>Capítulo 5. Viabilidad Comercial de la Impresión 3D de Alimentos en España</i>		95
5.1.	Panorama Global: Oportunidades y Líneas de Desarrollo Internacional	95
5.2.	El Ecosistema de Impresión 3D de Alimentos en España: Estado Actual y Perspectivas	96
5.2.1.	Perfil del Consumidor Español y Aceptación de la Tecnología	96
5.2.2.	Barreras Culturales, Normativas y de Percepción	97
5.2.3.	Casos Destacados en España: Novameat y otras Startups Emergentes..	97
5.2.3.1.	Novameat: Impresión 3D de Carne Vegetal para Mercados Masivos	98
5.2.3.2.	Cocuu: Escala Industrial y Proteína Mimética.....	98
5.2.3.3.	Natura Machines: Foodini para Hogar y Restauración	98
5.2.3.4.	Comparativa Resumida de Diferentes Startups Emergentes	98
5.3.	Factores Clave para la Implantación Comercial en España	99
5.3.1.	Variables Tecnológicas: Disponibilidad, Mantenimiento y Escalabilidad .	99
5.3.2.	Variables Económicas: Costes de Inversión, Operación y Retorno Esperado	99
5.3.3.	Variables Sociales y Culturales: Aceptación, Hábitos y Segmentación .	99
5.3.4.	Variables Regulatorias y de Seguridad Alimentaria	100
5.3.5.	Variables de Mercado y Competitividad	100
5.4.	Análisis Interno y Externo: Matriz Dafo	100
5.5.	Análisis Económico Detallado de la Tecnología	101
5.5.1.	Supuestos y Metodología del Análisis Financiero.....	101
5.5.1.1.	Inversión Inicial	102
5.5.1.2.	Amortización del Sistema y Coste Objetivo.....	102
5.5.1.3.	Costes de Electricidad	103
5.5.1.4.	Costes de Producción por Unidad	103
5.5.2.	Análisis del Punto de Equilibrio.....	106
5.5.3.	Análisis de Retorno sobre la Inversión (ROI) y Plazo de Recuperación (Payback)	107

5.6. Evaluación de Riesgos Económicos y Escenarios Adversos en el Contexto Español	108
<i>Capítulo 6. Conclusiones y Proyecciones Futuras</i>	<i>111</i>
6.1. Conclusiones del Proyecto	111
6.2. Contribuciones Técnicas y Resultados Destacados	112
6.2.1. Desarrollo de materiales funcionales para impresión 3D	112
6.2.2. Validación Experimental de Procesos Multicapa	112
6.2.3. Consolidación de una Metodología Integral	112
6.3. Limitaciones del Estudio y Trabajos Futuros	113
6.3.1. Ampliación del Espectro de Materias Primas	113
6.3.2. Implementación de Técnicas Postimpresión Avanzadas	114
6.3.3. Ausencia de Valoración Sensorial Sistemática	115
6.4. Proyecciones Estratégicas y Escenarios de Aplicación	115
6.4.1. Restauración Creativa y Alta Gastronomía	115
6.4.2. Producción Semiindustrial con Granjas de Impresoras 3D	116
6.4.3. Nutrición Personalizada y Aplicaciones Clínicas	117
6.4.4. Síntesis Estratégica y Rutas de Escalado	118
6.5. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible	119
6.5.1. ODS 2 – Hambre Cero	119
6.5.2. ODS 3 – Salud y Bienestar	119
6.5.3. ODS 9 – Industria, Innovación e Infraestructura	119
6.5.4. ODS 12 – Producción y Consumo Responsables	119
6.5.5. ODS 13 – Acción por el Clima	119
<i>Referencias</i>	<i>120</i>
<i>Anexo A. Parámetros Técnicos de Impresión</i>	<i>132</i>
A.1. Parámetros de Chocolate Negro	132
A.2. Parámetros de Chocolate Blanco	134
A.3. Parámetros de Zanahoria Hidrolizada	137
A.4. Parámetros de Zanahoria Deshidratada	139
A.5. Parámetros de Brócoli Deshidratado	142
A.6. Parámetros de Lombarda Deshidratada	144
<i>Anexo B. Geometrías de Impresión 3D Generadas en Simplify3D</i>	<i>147</i>

Índice de Figuras

Figura 1. FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer.	14
Figura 2. Representación del Proceso de Fotopolimerización en Cubeta (VPP) [10]....	16
Figura 3. Representación del Proceso de Extrusión de Materiales (ME) [12].	17
Figura 4. Representación del Proceso de Fusión en Lecho de Polvo (PBF) [18].	18
Figura 5. Representación del Proceso de Binder Jetting (BJ) [20].	19
Figura 6. Representación del Proceso de Material Jetting (MJT) [23].	20
Figura 7. Representación del Proceso de Sheet Lamination (SHL) [24].	21
Figura 8. Ejemplo del Uso de la Impresión 3D en el Sector de la Automoción [25].	23
Figura 9. Ejemplo del Uso de la Impresión 3D en Construcción [25].	23
Figura 10. Ejemplo del Uso de la Impresión 3D en Odontología [26].	25
Figura 11. Ejemplo del Uso de la Impresión 3D en el Sector Aeroespacial [27].	26
Figura 12. Ejemplo del Uso de la Impresión 3D en el Sector Minorista [28].	27
Figura 13. Ejemplo del Uso de la Impresión 3D en Joyería [29].	28
Figura 14. Ejemplo del Uso de la Impresión 3D en Alimentación [30].	29
Figura 15. Aplicaciones del Chocolate en Impresión 3D de Alimentos [33].	36
Figura 16. Etiquetado nutricional del chocolate negro fondant Nestlé Postres.	52
Figura 17. Resultados del Ensayo 1 de Impresión 3D con Chocolate Negro.	54
Figura 18. Resultados del Ensayo 2.1 de Impresión 3D con Chocolate Negro.	56
Figura 19. Resultados del Ensayo 3 de Impresión 3D con Chocolate Negro.	57
Figura 20. Etiquetado nutricional del chocolate blanco fondant Nestlé Postres.	59
Figura 21. Resultados del Ensayo 3 con Chocolate Blanco.	61
Figura 22. Resultados del Ensayo 4.	63
Figura 23. Resultados de la Aplicación del Nitrógeno Líquido.	63
Figura 24. Resultados del Ensayo 1 de Zanahoria Cocida.	68
Figura 25. Resultados Ensayo 1 con Mezcla 1 tras 24h de Reposo.	68
Figura 26. Resultados del Ensayo 2.1.	70
Figura 27. Resultados del Ensayo 2.1 tras 24h de Reposo.	70
Figura 28. Comienzo de Impresión del Ensayo 2.2.	71
Figura 29. Resultados del Ensayo 2.2.	71
Figura 30. Resultado final del Ensayo 2.2 tras 24h de reposo.	72
Figura 31. Deshidratadora doméstica WMF Kitchenminis Snack to Go.	74
Figura 32. Proceso de deshidratación de zanahoria: bandejas con rodajas frescas antes del secado (izquierda) y zanahoria deshidratada tras el proceso térmico (derecha).	75
Figura 33. Pulverización de la zanahoria deshidratada en molino de cuchillas (izquierda) y polvo resultante tamizado y almacenado herméticamente (derecha).	75
Figura 34. Resultados del Ensayo 3.2.	77
Figura 35. Proceso de Impresión del Ensayo 1 con Brócoli Deshidratado.	83
Figura 36. Resultados del Ensayo 1 con Brócoli Deshidratado.	84
Figura 37. Proceso de Impresión del Ensayo 2 con Brócoli Deshidratado.	85
Figura 38. Resultados del Ensayo 2 con Brócoli Deshidratado.	86
Figura 39. Resultados del Ensayo 2 con Brócoli Deshidratado – 24h de Reposo.	86
Figura 40. Resultados del Ensayo 1.1 con Lombarda Deshidratada.	91
Figura 41. Resultados del Ensayo 1.2 con Lombarda Deshidratada.	92
Figura 42. Resultados del Ensayo 1.1 con Lombarda Deshidratada – 24 h de Reposo.	92
Figura 43. Resultados del Ensayo 1.2 con Lombarda Deshidratada – 24 h de Reposo.	93

Figura 44. Análisis Interno y Externo de la I3D en España en Forma de Matriz DAFO.	101
Figura 45. Diagrama de Cascada Sintetizando los Costes Unitarios de Producción....	106
Figura 46. Granja de Impresoras [136].....	117
Figura 47. Síntesis de la Estrategia de Escalado de la I3D de Alimentos en España. ...	118

Índice de Tablas

Tabla 1. Cronograma propuesto para el Trabajo de Fin de Grado.....	13
Tabla 2. Comparativa de Técnicas de Fabricación Aditiva.	33
Tabla 3. Polimorfos de la manteca de cacao y sus propiedades.	37
Tabla 4. Ejemplos de ingredientes funcionales y sus efectos en matrices vegetales.....	39
Tabla 5. Ejemplos de ingredientes funcionales y sus efectos geles de frutas.....	43
Tabla 6. Parámetros de Impresión 3D óptimos para Chocolate Negro.	58
Tabla 7. Parámetros de Impresión 3D óptimos para Chocolate Blanco.	65
Tabla 8. Mezcla de Puré de Zanahoria para el Ensayo 1 de Zanahoria Cocida.....	67
Tabla 9. Mezcla de Puré de Zanahoria para el Ensayo 2 de Zanahoria Cocida.....	69
Tabla 10. Mezcla de Puré de Zanahoria para el Ensayo 2 de Zanahoria Cocida.....	72
Tabla 11. Mezcla para el Ensayo de Zanahoria Deshidratada.	76
Tabla 12. Parámetros de Impresión 3D óptimos para Zanahoria Deshidratada.	78
Tabla 13. Formulación de la Mezcla del Ensayo 1 con Brócoli Deshidratado.....	81
Tabla 14. Procedimiento de Preparación de la Mezcla del Ensayo 1 con Brócoli Deshidratado.....	82
Tabla 15. Parámetros de Impresión 3D óptimos para Brócoli Deshidratado.	87
Tabla 16. Formulación de la Mezcla del Ensayo con Lombarda Deshidratada.	90
Tabla 17. Procedimiento de Preparación de la Mezcla del Ensayo con Lombarda Deshidratada.	90
Tabla 18. Parámetros de Impresión 3D óptimos para Lombarda Deshidratada.	94
Tabla 19. Comparativa Resumida de los Modelos de Negocio de Diferentes Startups Emergentes.	98
Tabla 20. Desglose de la Inversión Inicial.....	102
Tabla 21. Supuesto de Costes de Producción Unitarios en Impresión 3D.	105
Tabla 22. Escenarios en Función del Precio de Venta por Unidad.	106
Tabla 23. Escenarios de Análisis de ROI y Payback según Precio de Venta.....	108
Tabla 24. Matriz de riesgos económicos y operativos en la implantación de impresión 3D de alimentos en España.....	110

Índice de Tablas de Anexos

Tabla A. 1. Parámetros del Extrusor para Chocolate Negro.....	132
Tabla A. 2. Parámetros de Capa para Chocolate Negro.....	132
Tabla A. 3. Parámetros de Capas Sólidas para Chocolate Negro.	132
Tabla A. 4. Parámetros de Temperatura para Chocolate Negro.....	133
Tabla A. 5. Parámetros del Relleno para Chocolate Negro.	133
Tabla A.6. Parámetros del Relleno de Soporte para Chocolate Negro.	133
Tabla A. 7. Parámetros de Velocidad para Chocolate Negro.....	134
Tabla A. 8. Parámetros del Extrusor para Chocolate Blanco.....	134
Tabla A. 9. Parámetros de Capa para Chocolate Blanco.	135
Tabla A. 10. Parámetros de Capas Sólidas para Chocolate Blanco.	135
Tabla A. 11. Parámetros de Temperatura para Chocolate Blanco.....	135
Tabla A. 12. Parámetros del Relleno para Chocolate Blanco.....	135
Tabla A. 13. Parámetros del Relleno de Soporte para Chocolate Blanco.....	136
Tabla A. 14. Parámetros de Velocidad para Chocolate Blanco.....	136
Tabla A. 15. Parámetros del Extrusor para Zanahoria Hidrolizada.	137
Tabla A. 16. Parámetros de Capa para Zanahoria Hidrolizada.....	137
Tabla A. 17. Parámetros de Capas Sólidas para Zanahoria Hidrolizada.	137
Tabla A. 18. Parámetros de Temperatura para Zanahoria Hidrolizada.....	138
Tabla A. 19. Parámetros del Relleno para Zanahoria Hidrolizada.	138
Tabla A. 20. Parámetros del Relleno de Soporte para Zanahoria Hidrolizada.	138
Tabla A. 21. Parámetros de Velocidad para Zanahoria Hidrolizada.....	139
Tabla A. 22. Parámetros del Extrusor para Zanahoria Deshidratada.....	139
Tabla A. 23. Parámetros de Capa para Zanahoria Deshidratada.	140
Tabla A. 24. Parámetros de Capas Sólidas para Zanahoria Deshidratada.	140
Tabla A. 25. Parámetros de Temperatura para Zanahoria Deshidratada.....	140
Tabla A. 26. Parámetros del Relleno para Zanahoria Deshidratada.	140
Tabla A. 27. Parámetros del Relleno de Soporte para Zanahoria Deshidratada.....	141
Tabla A. 28. Parámetros de Velocidad para Zanahoria Deshidratada.....	141
Tabla A. 29. Parámetros del Extrusor para Brócoli Deshidratado.....	142
Tabla A. 30. Parámetros de Capa para Brócoli Deshidratado.	142
Tabla A. 31. Parámetros de Capas Sólidas para Brócoli Deshidratado.	142
Tabla A. 32. Parámetros de Temperatura para Brócoli Deshidratado.....	143
Tabla A. 33. Parámetros del Relleno para Brócoli Deshidratado.	143
Tabla A. 34. Parámetros del Relleno de Soporte para Brócoli Deshidratado.....	143
Tabla A. 35. Parámetros de Velocidad para Brócoli Deshidratado.....	144
Tabla A. 36. Parámetros del Extrusor para Lombarda Deshidratada.....	144
Tabla A. 37. Parámetros de Capa para Lombarda Deshidratada.	145
Tabla A. 38. Parámetros de Capas Sólidas para Lombarda Deshidratada.	145
Tabla A. 39. Parámetros de Temperatura para Lombarda Deshidratada.	145
Tabla A. 40. Parámetros del Relleno para Lombarda Deshidratada.....	145
Tabla A. 41. Parámetros del Relleno de Soporte para Lombarda Deshidratada.....	146
Tabla A. 42. Parámetros de Velocidad para Lombarda Deshidratada.....	146

Capítulo 1. Introducción y Planteamiento del Proyecto

1.1. Introducción al Proyecto

La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, es una tecnología innovadora que permite crear objetos tridimensionales a partir de diseños digitales mediante la adición de capas sucesivas de material. Aplicada al sector alimentario, la impresión 3D fusiona ingeniería, gastronomía y sostenibilidad, permitiendo producir alimentos personalizados con precisión y eficiencia [1], [2].

Este Trabajo de Fin de Grado explora la impresión 3D de alimentos desde cuatro perspectivas clave:

1. Caracterización técnica precisa de las materias primas: Analizando propiedades como la viscosidad, estabilidad estructural y comportamiento térmico durante la extrusión.
2. Desarrollo y producción práctica: Diseño 3D de alimentos utilizando el software CAD Solid Edge y Simplify3D, e impresión física mediante la impresora FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer.
3. Evaluación económico-técnica integral: Estudio de viabilidad y costes asociados a la implementación tecnológica en casos reales, incluyendo escenarios comerciales concretos.
4. Análisis estratégico de la tecnología: Identificación sistemática de ventajas, limitaciones, y proyecciones futuras, considerando aplicaciones en sostenibilidad alimentaria, personalización nutricional y reducción de desperdicios.

El objetivo fundamental del trabajo es determinar cómo la impresión 3D puede transformar radicalmente la producción y el consumo de alimentos. Ante desafíos globales crecientes como la escasez de recursos, el aumento poblacional, y la demanda por dietas más sostenibles y personalizadas, esta tecnología emerge como una solución potencialmente disruptiva, tanto a nivel doméstico como industrial [3].

A través de ensayos experimentales específicos con materiales representativos como chocolates y vegetales, se investigará la capacidad real y las limitaciones prácticas de la tecnología, evaluando rigurosamente los parámetros críticos de impresión como la temperatura y la velocidad de extrusión. Además, mediante un enfoque económico detallado, se estudiará la rentabilidad y viabilidad comercial del uso de impresión 3D en contextos específicos como pastelería y restauración personalizada.

Este análisis permitirá proporcionar recomendaciones claras sobre cómo maximizar el potencial de esta tecnología emergente, destacando particularmente su relevancia estratégica para afrontar desafíos alimentarios futuros, reduciendo el desperdicio, optimizando recursos y mejorando la experiencia del consumidor.

1.2. Motivación del Proyecto

La fabricación aditiva es considerada una de las tecnologías más disruptivas y revolucionarias de las últimas décadas debido a su capacidad única para transformar

procesos industriales y cotidianos. Esta tecnología permite crear objetos tridimensionales complejos capa por capa con precisión, personalización y eficiencia nunca antes vistas.

En el contexto alimentario, la impresión 3D también está demostrando un potencial extraordinario y altamente disruptivo, especialmente en aplicaciones de salud y bienestar. Un ejemplo notable es la investigación llevada a cabo por la Universidad del Oeste de Inglaterra (UWE Bristol), que en 2024 desarrolló alimentos impresos en 3D especialmente diseñados para personas con disfagia. Estos alimentos no solo son nutricionalmente adecuados y seguros para la ingestión, sino que también mantienen un atractivo visual que mejora significativamente la experiencia alimentaria y la calidad de vida de estos pacientes [4].

La motivación de este Trabajo de Fin de Grado radica en el interés por explorar en profundidad una tecnología innovadora con potencial transformador para el sector alimentario. El objetivo es analizar cómo la impresión 3D de alimentos puede ofrecer soluciones prácticas y estratégicas frente a desafíos globales críticos como la accesibilidad alimentaria, la reducción del desperdicio y la creación de productos nutricionales personalizados. Este enfoque busca aportar conocimientos técnicos aplicados que contribuyan a mejorar la eficiencia, sostenibilidad y adaptabilidad del consumo alimentario en contextos presentes y futuros.

1.3. Objetivos del Proyecto

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es evaluar exhaustivamente la viabilidad técnica, económica y estratégica de implementar la tecnología de impresión 3D en el sector alimentario, con especial énfasis en aplicaciones prácticas e innovadoras que contribuyan a la sostenibilidad y personalización en la producción de alimentos.

Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar técnicamente las materias primas para impresión 3D de alimentos.

Se realizará un análisis profundo de entre dos y tres materiales representativos (como chocolate o vegetales), centrado en sus propiedades reológicas y térmicas. Esta caracterización permitirá determinar su comportamiento durante la extrusión y su idoneidad para aplicaciones alimentarias, aportando criterios clave para futuras formulaciones industriales.

- Diseñar digitalmente e imprimir productos alimentarios mediante la impresora FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer.

Se utilizarán los softwares CAD Solid Edge y Simplify3D para desarrollar modelos tridimensionales de alimentos, que serán fabricados posteriormente con la impresora mencionada. Se evaluará la fidelidad geométrica, la precisión de impresión y la calidad estructural de los productos obtenidos, con el fin de validar el proceso desde el diseño hasta el resultado físico.

- Evaluar la viabilidad económico-financiera de la implantación de la impresión 3D de alimentos a través de un modelo de negocio concreto.

Se construirá un modelo de costes completo que incluirá la inversión inicial, los costes de materias primas, operación, mantenimiento y amortización tecnológica. Este análisis se aplicará a un escenario comercial específico, con el fin de estimar indicadores clave como el retorno de la inversión (ROI), el periodo de payback y los márgenes operativos. De este modo, se podrá identificar la rentabilidad del modelo, los puntos críticos del proceso y las condiciones necesarias para su escalabilidad industrial.

- Analizar estratégicamente las ventajas, limitaciones y proyecciones futuras de esta tecnología en el ámbito alimentario.

Se desarrollará un análisis integrador de los resultados obtenidos, que incluirá una valoración crítica del estado del arte, así como las oportunidades de mejora y expansión futura. Se tendrá en cuenta el impacto potencial sobre la sostenibilidad, la salud pública y la eficiencia en la cadena alimentaria.

1.4. Metodología y Planificación del Proyecto

La metodología empleada en este Trabajo de Fin de Grado se estructura en cinco fases claramente alineadas con los objetivos definidos. Combina análisis técnico, diseño experimental, modelado económico y reflexión estratégica, utilizando herramientas especializadas y procedimientos rigurosos para garantizar resultados precisos y validados.

1.4.1. Estudio del estado del arte

Se llevará a cabo una revisión exhaustiva de la literatura científica, informes técnicos y casos prácticos relevantes sobre la aplicación de la impresión 3D en el ámbito alimentario. Esta fase permitirá establecer una base sólida de conocimiento, identificar tendencias actuales y detectar vacíos tecnológicos o desafíos no resueltos.

1.4.2. Caracterización de materias primas para impresión 3D

Se seleccionarán entre dos y tres sustancias comestibles (como chocolate, vegetales u otras matrices alimentarias) para analizar sus propiedades reológicas y térmicas mediante ensayos de viscosidad, extrusabilidad y comportamiento estructural. Esta etapa permitirá determinar su idoneidad para ser utilizadas como materiales imprimibles.

1.4.3. Diseño digital e impresión de productos alimentarios

Se diseñarán modelos tridimensionales mediante el software CAD Solid Edge y se prepararán para su impresión utilizando Simplify3D. Las impresiones se realizarán con la impresora FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer. Los resultados serán evaluados en términos de fidelidad geométrica, precisión dimensional, estabilidad de las capas y reproducibilidad del proceso.

1.4.4. Evaluación técnico-económica aplicada a un modelo de negocio.

Se construirá un modelo de costes que incluirá inversiones, materias primas, costes de operación, mantenimiento y amortización. Este análisis se aplicará a un caso práctico realista (como la pastelería personalizada o restauración especializada), calculando

métricas clave como retorno de la inversión (ROI), periodo de amortización (payback) y márgenes de rentabilidad.

1.4.5. Análisis estratégico de la tecnología

A partir de los resultados técnicos y económicos, se elaborará un análisis DAFO (Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades) de la impresión 3D de alimentos. Se considerarán también los impactos potenciales en sostenibilidad, personalización nutricional y eficiencia de los sistemas alimentarios.

A continuación, se representa en la Tabla 8 un Diagrama de Gantt con la cronología propuesta para el desarrollo del proyecto. En dicha planificación se contemplan dos sustancias principales a caracterizar (S1 y S2), con la posibilidad de incluir una tercera (S3) si los tiempos de diseño e impresión lo permiten.

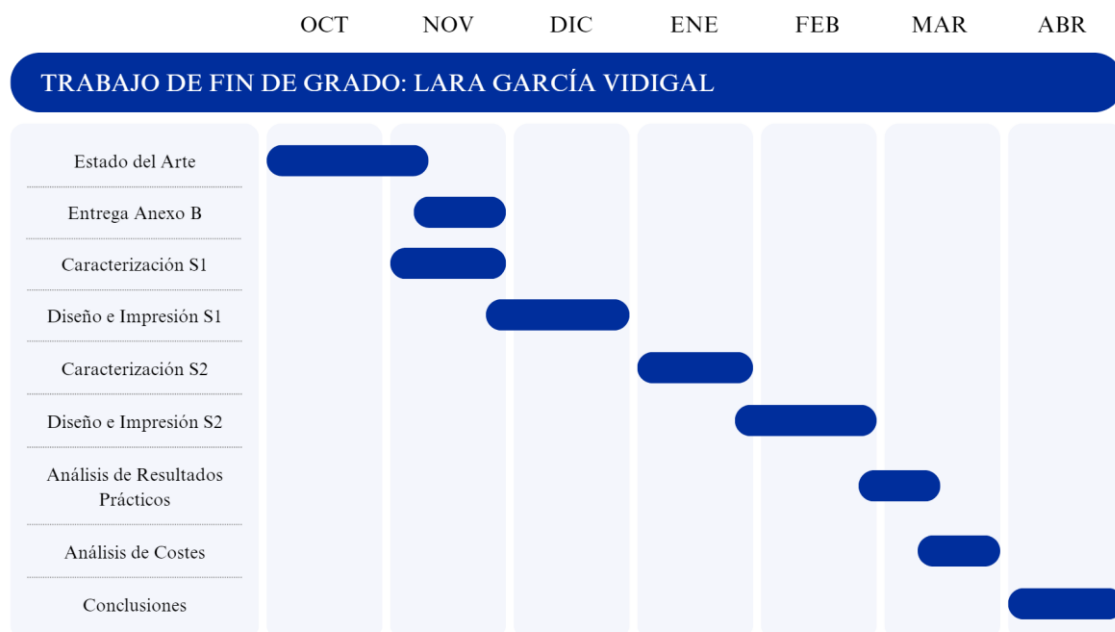


Tabla 1. Cronograma propuesto para el Trabajo de Fin de Grado.

1.5. Recursos a Emplear

1.5.1. FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer

La impresora FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer es una herramienta avanzada para la fabricación de alimentos mediante tecnología de impresión 3D. Este modelo concreto se distingue por su sistema Switch Head, que permite cambiar entre diferentes cabezales de impresión – de plástico o acero – de forma rápida y sencilla [5].

Esto la hace ideal para trabajar con una amplia gama de ingredientes, que pueden utilizarse con facilidad gracias a las boquillas de extrusión de diferentes diámetros. Además, esta impresora es particularmente relevante para aplicaciones en las que se busca

personalizar los alimentos según sus características texturales, nutricionales y estéticas, permitiendo crear una variedad de estructuras complejas de manera eficiente.



Figura 1. FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer.

1.5.2. Solid Edge

Solid Edge es un software de diseño CAD 3D desarrollado por Siemens Digital Industries Software que ofrece herramientas avanzadas de modelado, simulación y creación de prototipos. Es ideal para diseños de impresión 3D, ya que permite crear modelos precisos con geometrías complejas, optimizar diseños mediante simulaciones y exportar archivos en formatos compatibles como STL [6].

1.5.3. Simplify3D

Simplify3D es un software de *slicing* desarrollado por Simplify3D LLC que convierte modelos 3D en *G-code* para impresoras 3D, ideal para optimizar calidad, tiempo y uso de material en impresiones 3D. Ofrece control avanzado de parámetros, vista previa de capas y compatibilidad con más de 500 impresoras, incluida la FELIX Food 1.6 Switch Head 3D Printer. El software permite adaptarse a las características únicas de cada impresora, como el tamaño de la cama, el tipo de extrusora o los materiales utilizados. Además, simplifica la integración mediante perfiles preconfigurados que pueden ajustarse manualmente para obtener resultados óptimos [7].

Capítulo 2. Estado de la Técnica

Este capítulo tiene como objetivo proporcionar una visión general del estado actual de la tecnología de fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D. Se describen las principales técnicas disponibles, sus aplicaciones transversales en distintos sectores industriales, el impacto que tienen sobre la sostenibilidad, así como las limitaciones técnicas y económicas que aún presenta. Este marco contextual es fundamental para entender el desarrollo posterior del proyecto, que se centrará específicamente en la aplicación de esta tecnología en el sector alimentario.

2.1. Técnicas de Fabricación Aditiva

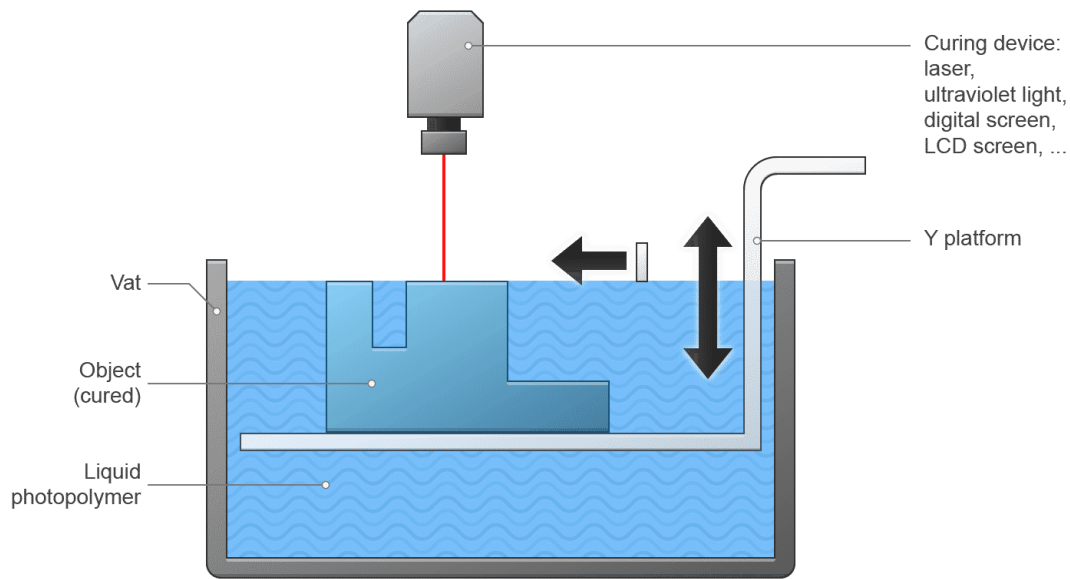
La fabricación aditiva ha transformado profundamente los enfoques tradicionales de diseño y producción en numerosos sectores industriales. Con el objetivo de facilitar su comprensión y estandarización, la norma UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017 clasifica estos procesos en siete categorías tecnológicas genéricas: Vat Photopolymerization (VPP), Material Extrusion (ME), Powder Bed Fusion (PBF), Binder Jetting (BJT), Material Jetting (MJT), Sheet Lamination (SHL) y Directed Energy Deposition (DED) [8]. Este marco normativo proporciona una terminología unificada y un lenguaje común que permite comparar de forma rigurosa las distintas técnicas, lo cual resulta fundamental para su correcta implementación y análisis técnico [8].

En los apartados siguientes se abordará cada una de estas categorías, comenzando por una descripción de su principio de funcionamiento, seguida del análisis de los materiales comúnmente empleados y la exposición de ejemplos representativos de aplicación. Esta revisión constituye la base necesaria para valorar el alcance, las oportunidades y las limitaciones de la impresión 3D en el contexto tecnológico actual.

2.1.1. Fotopolimerización en Cubeta

La fotopolimerización en cubeta (Vat Photopolymerization, VPP) es una de las técnicas de fabricación aditiva más consolidadas y ampliamente utilizadas, especialmente en sectores donde se requiere alta precisión y detalle superficial. Su principio de funcionamiento se basa en la solidificación selectiva de una resina líquida fotosensible contenida en una cubeta, mediante la exposición controlada a una fuente de luz —habitualmente un láser ultravioleta o un proyector digital— que activa el proceso de fotopolimerización capa a capa (véase Figura 2) [8].

Existen diversas variantes dentro de esta categoría, siendo las más representativas la estereolitografía (SLA) y el procesamiento digital de luz (DLP). En el caso de la SLA, un láser traza la sección transversal de cada capa sobre la superficie de la resina, mientras que el DLP proyecta simultáneamente una imagen completa de cada capa, lo que permite velocidades de impresión superiores [9]. En ambos casos, una vez curada la capa, la plataforma desciende y el proceso se repite hasta completar la pieza. El nivel de resolución que ofrece VPP es excepcional, lo que la hace idónea para componentes con geometrías complejas o detalles finos.



2018 © Dassault Systèmes

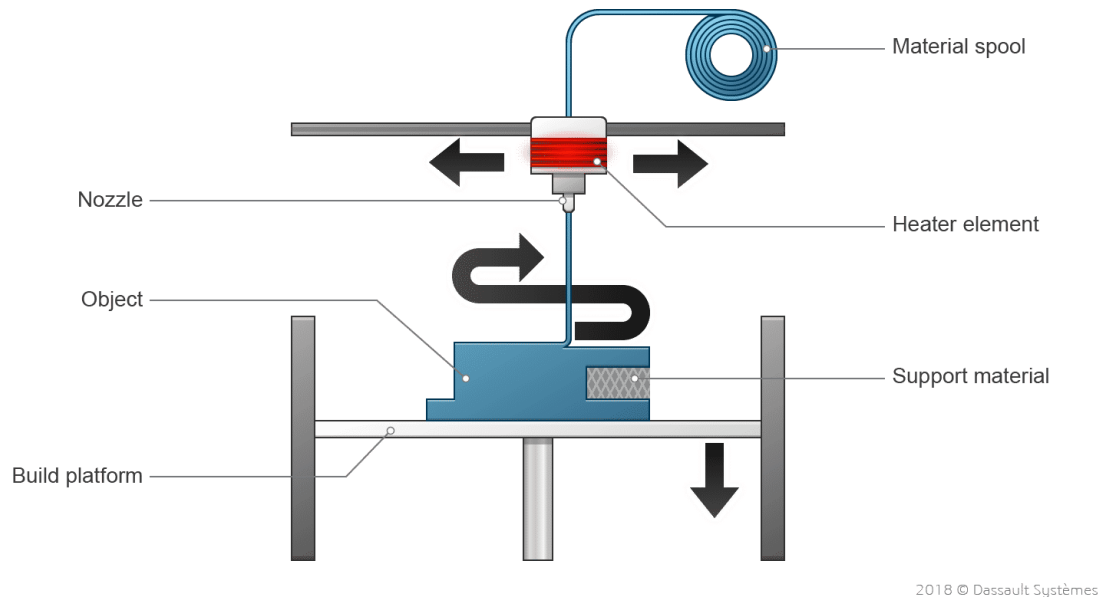
Figura 2. Representación del Proceso de Fotopolimerización en Cubeta (VPP) [10].

Los materiales empleados son resinas fotopoliméricas, formuladas a base de monómeros y oligómeros acrílicos, epóxicos o híbridos, que pueden modificarse con cargas cerámicas, metálicas o biocompatibles para aplicaciones específicas. Estas resinas ofrecen una buena estabilidad dimensional, aunque pueden presentar cierta fragilidad o sensibilidad a la humedad si no se postprocesan adecuadamente [11].

Entre sus aplicaciones más destacadas se encuentran la fabricación de modelos dentales y quirúrgicos en medicina, prototipos funcionales en ingeniería de producto, y patrones para moldeado por inversión en la industria joyera. La capacidad de producir piezas con alta resolución superficial y precisión geométrica convierte a la VPP en una opción estratégica cuando el acabado y el detalle son prioritarios frente a la resistencia mecánica o la productividad en grandes volúmenes.

2.1.2. Extrusión de Materiales

La extrusión de material (Material Extrusion, ME) es una de las tecnologías de fabricación aditiva más extendidas a nivel global, debido a su simplicidad, bajo coste y amplia versatilidad. Este proceso consiste en la deposición selectiva de un material termoplástico fundido o una pasta de alta viscosidad, que se extruye a través de una boquilla en movimiento siguiendo una trayectoria capa a capa, generando la pieza tridimensional según un modelo digital (véase Figura 3) [8], [11]. El sistema más representativo de esta categoría es la Fabricación con Filamento Fundido (FFF), también conocida como Fused Deposition Modeling (FDM).



2018 © Dassault Systèmes

Figura 3. Representación del Proceso de Extrusión de Materiales (ME) [12].

Los materiales más comúnmente empleados en el ámbito industrial incluyen termoplásticos como el ácido poliláctico (PLA), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), polietileno tereftalato glicol (PETG) o nylon. En el contexto de la impresión 3D de alimentos, se emplean pastas y geles comestibles como purés de vegetales, masas de chocolate, mezclas de almidón y matrices hidrocoloides como carragenina, goma xantana o alginato. Estos materiales deben presentar propiedades reológicas óptimas que garanticen una extrusión fluida y, al mismo tiempo, una estabilidad estructural suficiente tras la deposición, siendo esta una de las principales áreas de investigación [1], [13], [14].

Las aplicaciones industriales de ME abarcan desde la creación de prototipos funcionales hasta la fabricación de utillajes, piezas de repuesto y componentes personalizados. En el sector alimentario, esta tecnología ha sido empleada con éxito para diseñar alimentos personalizados en forma, composición y valor nutricional, así como productos adaptados a necesidades especiales, como es el caso de personas con disfagia [2], [4], [15]. Gracias a su compatibilidad con materiales blandos y su precisión volumétrica, ME ha abierto nuevas posibilidades en la personalización nutricional, gastronomía digital y producción de alimentos funcionales [16].

Entre sus ventajas destacan la facilidad de uso, el bajo coste de entrada y la amplia gama de materiales compatibles. Sin embargo, presenta limitaciones en cuanto a resolución superficial, precisión dimensional y velocidad de impresión en comparación con otras técnicas como la fotopolimerización (VPP) o la fusión de lecho de polvo (PBF) [9], [17]. No obstante, su adaptabilidad y continua evolución técnica la mantienen como una de las tecnologías clave dentro del ecosistema de fabricación aditiva.

2.1.3. Fusión en Lecho de Polvo

La fusión en lecho de polvo (Powder Bed Fusion, PBF) es una de las tecnologías de fabricación aditiva más sofisticadas, utilizada principalmente para aplicaciones

industriales de alta precisión. Este proceso consiste en la deposición de una fina capa de polvo (metálico, cerámico o polimérico) sobre una plataforma, seguida de su fusión selectiva mediante una fuente de energía, como un láser o haz de electrones (véase Figura 4). Una vez finalizada cada capa, se repite el proceso de aplicación y fusión de polvo hasta completar la geometría tridimensional deseada [8], [9], [11].

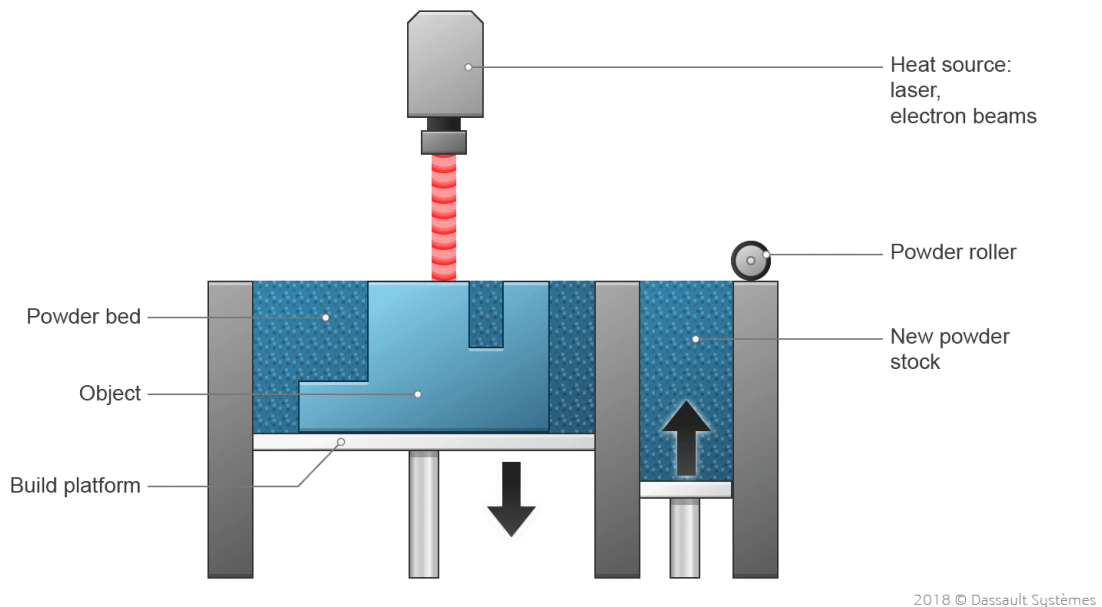


Figura 4. Representación del Proceso de Fusión en Lecho de Polvo (PBF) [18].

Las variantes más comunes dentro de esta categoría son el sinterizado selectivo por láser (SLS), utilizado mayormente con polímeros, y la fusión selectiva por láser (SLM o DMLS), empleada con metales como acero, titanio o aluminio. En ambas técnicas, es fundamental el control térmico y el ambiente de trabajo (inertización con argón o nitrógeno) para garantizar la calidad de la pieza final, evitando oxidación o tensiones residuales [17].

En términos de materiales, el PBF permite una gran variedad de opciones, desde poliamidas reforzadas con fibra de vidrio, hasta aleaciones metálicas complejas, lo que ha impulsado su adopción en sectores como el aeroespacial, automotriz, médico-quirúrgico (implantes personalizados) y la industria de moldes [9], [11]. La alta resolución, densidad de las piezas, capacidad para generar estructuras complejas sin necesidad de soportes y la posibilidad de trabajar con materiales técnicos convierten esta tecnología en una herramienta clave para la fabricación directa de componentes finales de alto valor añadido.

No obstante, su elevado coste, tanto de los equipos como de los materiales y sistemas auxiliares (sistemas de reciclaje de polvo, controles atmosféricos, postprocesado térmico), limita su accesibilidad frente a otras técnicas como la extrusión de material (ME). Además, los tiempos de impresión suelen ser largos, y el postprocesado puede incluir etapas de retirada de polvo no fundido, tratamiento térmico, mecanizado y pulido, especialmente en piezas metálicas [17], [19].

2.1.4. Inyección de Aglutinante

La tecnología de inyección de aglutinante (Binder Jetting, BJT) se basa en la deposición selectiva de un aglutinante líquido sobre un lecho de polvo, siguiendo las capas de un modelo digital tridimensional. A diferencia de otros procesos como la fusión por láser, en BJT no se emplea calor para fundir el material, sino que se une de forma química o física mediante el aglutinante, lo cual permite imprimir a temperaturas más bajas y con menores requerimientos energéticos [8], [9], [11].

El proceso inicia con la extensión uniforme de una fina capa de polvo (metálico, cerámico, arena o incluso materiales alimentarios deshidratados) sobre la plataforma de trabajo. A continuación, un cabezal de impresión tipo inkjet libera pequeñas gotas del aglutinante únicamente en las zonas definidas por la geometría de la pieza (véase Figura 5). Tras solidificar cada capa, se deposita una nueva y se repite el ciclo hasta completar la estructura. Posteriormente, la pieza "verde" (es decir, sin consolidación total) puede requerir un tratamiento térmico de sinterizado o infiltración para alcanzar sus propiedades mecánicas finales [9], [17].

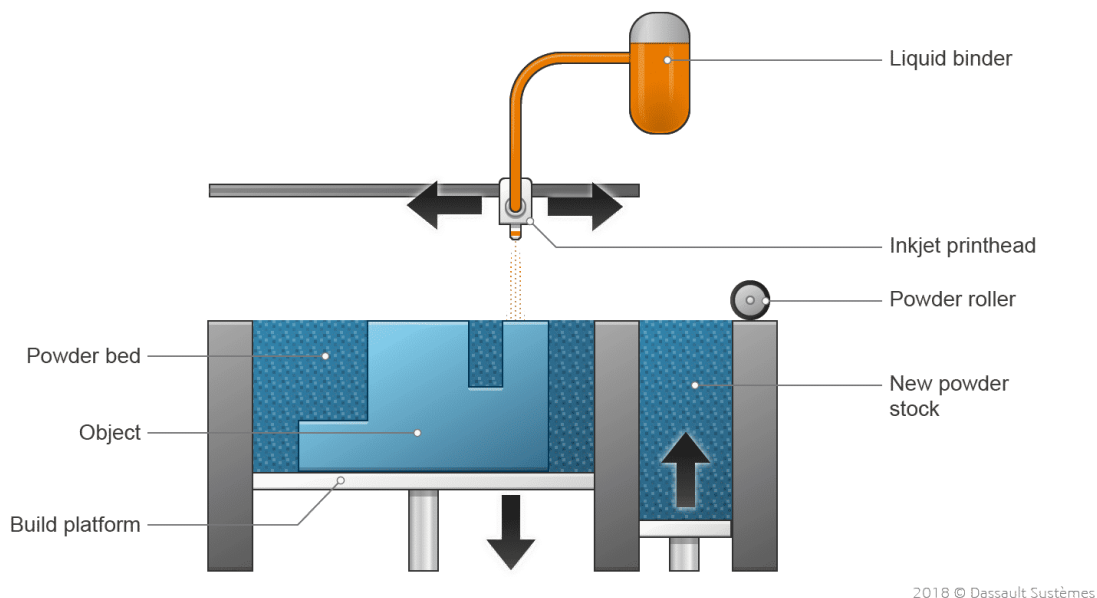


Figura 5. Representación del Proceso de Binder Jetting (BJ) [20].

Esta tecnología presenta ventajas notables, como una alta velocidad de fabricación, la posibilidad de trabajar sin soportes, y la capacidad para fabricar piezas a color mediante la incorporación de tintes en el aglutinante. Es especialmente valorada en el sector de prototipado arquitectónico, producción de moldes de fundición de arena, joyería personalizada y fabricación de piezas metálicas con geometrías complejas tras sinterizado [9], [21]. En el ámbito alimentario, algunos estudios han explorado su aplicación con ingredientes secos aglomerables, aunque su uso es aún incipiente debido a desafíos técnicos como el control de la porosidad, la comestibilidad del aglutinante y la precisión en la deposición del polvo [22], [16].

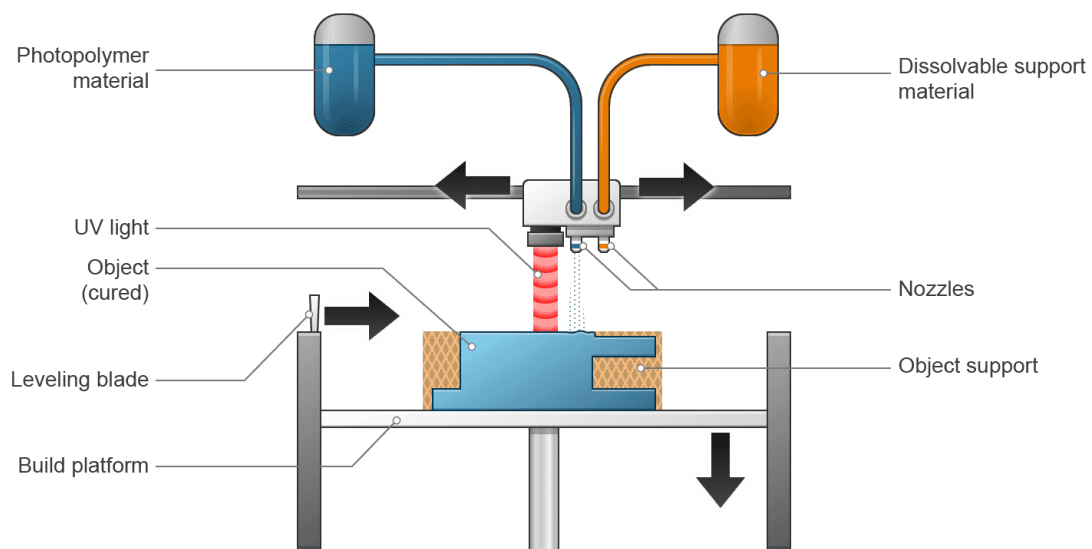
Entre sus principales limitaciones se encuentran la fragilidad de las piezas antes del posprocesado, la necesidad de una limpieza cuidadosa del polvo no aglutinado, y la

limitada gama de materiales certificados para su uso en aplicaciones estructurales. Sin embargo, su flexibilidad y potencial para la producción en serie de piezas complejas y de gran volumen hacen del BJT una tecnología con proyección en diversos sectores industriales [17], [19].

2.1.5. Chorro de Material

El chorro de material (Material Jetting, MJT) es una tecnología de fabricación aditiva que se basa en la proyección controlada de microgotas de material funcional —generalmente polímeros fotocurables o ceras— sobre una plataforma de construcción. Estas gotas se solidifican mediante un proceso térmico o fotoquímico (normalmente con luz ultravioleta), lo que permite construir piezas capa a capa con alta precisión y acabado superficial excelente [8], [9], [11].

El principio de funcionamiento del MJT es análogo al de una impresora de inyección de tinta, con la diferencia de que en lugar de tinta convencional, se emplean materiales diseñados específicamente para solidificarse de forma inmediata (véase Figura 6). Los cabezales de impresión pueden depositar múltiples materiales simultáneamente, lo que permite generar piezas multimaterial o con variaciones en color, dureza o propiedades mecánicas dentro de una misma impresión [9]. Además, las estructuras de soporte se generan a partir de materiales solubles que se eliminan fácilmente tras el proceso de impresión, lo cual facilita la producción de geometrías complejas.



2018 © Dassault Systèmes

Figura 6. Representación del Proceso de Material Jetting (MJT) [23].

Entre los materiales más comúnmente utilizados se encuentran las resinas fotocurables acrílicas, ceras de modelado y compuestos poliméricos formulados para aplicaciones específicas, como prototipos dentales, guías quirúrgicas, microcomponentes electrónicos o piezas funcionales con gradientes de rigidez [9], [17]. Esta tecnología destaca por su elevada resolución y capacidad para reproducir detalles finos con gran fidelidad, lo que

la convierte en una de las opciones preferidas para prototipado estético, producción de modelos anatómicos y odontología digital [15], [19].

No obstante, las principales limitaciones del MJT radican en la restricción de materiales disponibles, ya que requiere formulaciones líquidas con propiedades reológicas muy específicas, y en los elevados costes tanto de los equipos como de los consumibles. Asimismo, las piezas suelen presentar propiedades mecánicas limitadas para aplicaciones estructurales o sometidas a altas cargas, lo que restringe su uso a piezas no funcionales o de corta duración [9], [19].

2.1.6. Laminado de Láminas

El laminado de láminas (Sheet Lamination, SHL) es una técnica de fabricación aditiva que consiste en la superposición y adhesión secuencial de hojas delgadas de material para conformar un objeto tridimensional (véase Figura 7). Cada lámina se corta previamente según la geometría deseada para la capa correspondiente, y posteriormente se une a la anterior mediante un agente adhesivo o procesos térmicos como soldadura por ultrasonidos o compresión en caliente [8], [11].

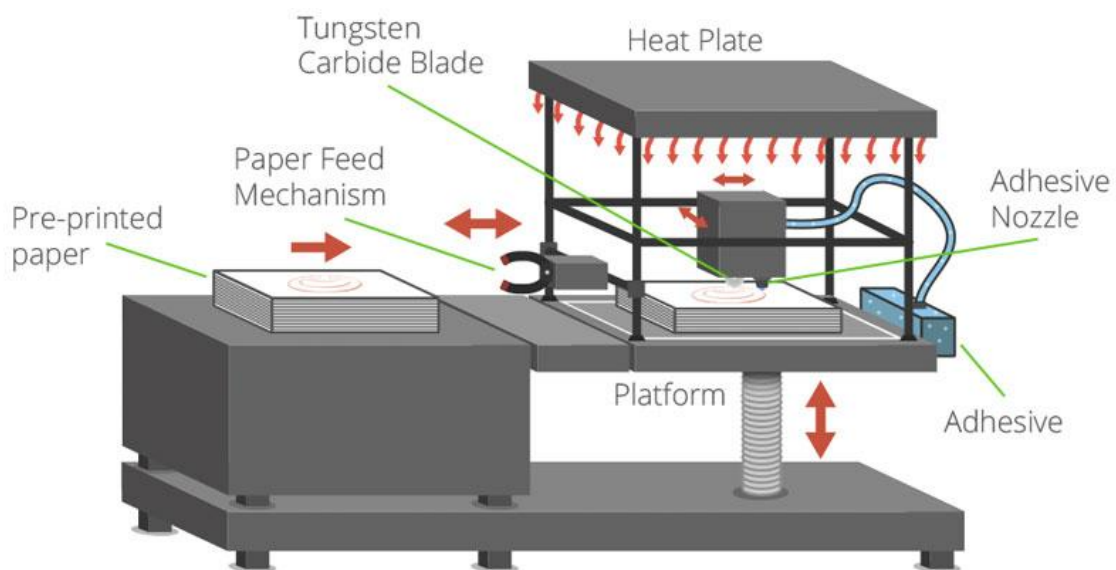


Figura 7. Representación del Proceso de Sheet Lamination (SHL) [24].

Los materiales empleados en SHL incluyen papel, polímeros, láminas metálicas o compuestos multicapa, dependiendo de la aplicación. Una de sus variantes más conocidas es Laminated Object Manufacturing (LOM), que utiliza papel recubierto con adhesivo activado por calor. En el caso de metales, se emplean sistemas como Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM), que combinan energía ultrasónica y presión para unir las láminas [9]. Esta técnica se distingue por su rapidez, bajo coste de material y capacidad para producir piezas de gran volumen, aunque generalmente requiere operaciones de postprocesado como mecanizado para mejorar el acabado superficial y eliminar excedente [9], [17].

Las aplicaciones más representativas del SHL se encuentran en el desarrollo de prototipos visuales de gran tamaño, estructuras internas para componentes compuestos, o piezas

metálicas con sensores embebidos, particularmente en el ámbito aeroespacial y de defensa [19], [21]. Su uso en el sector alimentario es muy limitado debido a la incompatibilidad de los materiales con las exigencias higiénico-sanitarias, aunque se exploran aproximaciones análogas en el trabajo con láminas comestibles pregelatinizadas.

Entre sus principales ventajas se encuentran la economía del proceso, la baja generación de residuos y la posibilidad de combinar múltiples materiales en una misma pieza. Sin embargo, las limitaciones mecánicas del adhesivo, la anisotropía estructural y la necesidad de postprocesos restrictivos dificultan su adopción en aplicaciones funcionales exigentes [9], [17].

2.2. Aplicaciones de la Fabricación Aditiva

La fabricación aditiva ha trascendido su papel inicial como herramienta para prototipado rápido, convirtiéndose en una tecnología transformadora en múltiples sectores industriales, médicos, creativos y científicos. Su capacidad para producir geometrías complejas, personalizar productos sin sobrecostes y reducir el desperdicio de material ha permitido redefinir paradigmas tradicionales de diseño y producción. Además, la posibilidad de fabricar bajo demanda y de forma localizada posiciona a la fabricación aditiva como un aliado clave en estrategias de sostenibilidad y eficiencia operativa [10], [11]. Las aplicaciones prácticas de la fabricación aditiva varían según la tecnología utilizada, los materiales disponibles y las necesidades específicas de cada sector. A continuación, se describen los principales ámbitos de aplicación.

2.2.1. Sector Industrial y Prototipado

Una de las aplicaciones más consolidadas de la fabricación aditiva es el prototipado rápido, técnica que ha transformado los procesos de desarrollo de productos al permitir la fabricación ágil de modelos funcionales o visuales sin necesidad de moldes ni utillajes costosos. Gracias a tecnologías como FDM, SLA y SLS, es posible validar diseños en cuestión de horas, realizar iteraciones frecuentes y reducir significativamente los ciclos de innovación, lo cual impacta positivamente en los tiempos de desarrollo y comercialización [9].

Más allá del prototipado, la fabricación aditiva ha demostrado su utilidad en entornos industriales como herramienta para la producción de componentes funcionales, especialmente en casos de bajo volumen o alta personalización. Esto incluye desde utillajes personalizados y carcasas específicas hasta repuestos difíciles de obtener por métodos convencionales. En sectores como la automoción (véase Figura 8) o la maquinaria industrial, la impresión 3D se utiliza, por ejemplo, para fabricar plantillas de ensamblaje o piezas de recambio obsoletas, lo que reduce la necesidad de inventarios físicos y los tiempos de parada operativa [17].

Una tendencia emergente es la integración de tecnologías aditivas en procesos híbridos, donde la impresión 3D se combina con técnicas sustractivas tradicionales para aprovechar las ventajas de ambos enfoques. Esta sinergia permite, por ejemplo, fabricar una pieza con geometría compleja mediante SLS o FDM, y posteriormente aplicar mecanizado CNC en zonas críticas para cumplir con tolerancias dimensionales estrictas [17].

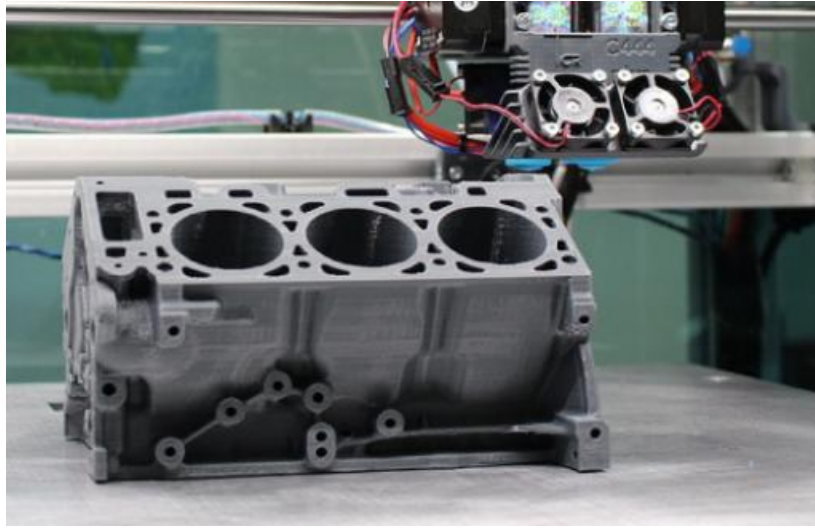


Figura 8. Ejemplo del Uso de la Impresión 3D en el Sector de la Automoción [25].

Además, la fabricación aditiva ofrece beneficios medioambientales al reducir el uso de material y los residuos generados, especialmente en comparación con métodos sustractivos. Su capacidad para fabricar bajo demanda y de forma localizada también contribuye a disminuir los costes logísticos y la huella de carbono, lo que refuerza su papel en modelos de producción más sostenibles [19].

2.2.2. Construcción y Grandes Estructuras

La fabricación aditiva ha comenzado a transformar también el sector de la construcción, mediante la impresión 3D de elementos estructurales a gran escala utilizando materiales como hormigón, geopolímeros o compuestos cementicios (véase Figura 9). Este enfoque, conocido como *construction-scale additive manufacturing*, permite automatizar procesos constructivos, reducir los tiempos de ejecución y minimizar los residuos generados en obra, al mismo tiempo que se habilita una mayor libertad en el diseño arquitectónico [17].



Figura 9. Ejemplo del Uso de la Impresión 3D en Construcción [25].

Uno de los métodos más desarrollados en este ámbito es el *Contour Crafting*, que emplea boquillas de extrusión controladas para depositar capas sucesivas de hormigón de forma precisa siguiendo trayectorias programadas. A diferencia de los métodos convencionales, esta técnica reduce significativamente la necesidad de encofrados y la intervención humana, lo que contribuye a mejorar la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad del proceso constructivo [17].

Además de su aplicación en viviendas y módulos habitacionales, la impresión 3D ha sido utilizada para fabricar componentes prefabricados personalizados como muros curvos, elementos ornamentales o estructuras no estándar que se adaptan a requerimientos estéticos, térmicos o estructurales específicos. En proyectos piloto y demostrativos se han construido puentes peatonales, mobiliario urbano e incluso prototipos de viviendas completas mediante impresión en sitio. También se investiga su uso en entornos extremos como zonas de catástrofes, desiertos o futuras misiones espaciales, donde la capacidad de fabricar estructuras autónomamente y con recursos locales resulta especialmente valiosa [19].

A pesar de su potencial, la fabricación aditiva en construcción enfrenta todavía retos relevantes, como la estandarización de materiales imprimibles, la integración de refuerzos estructurales, la certificación normativa y el aseguramiento de calidad en tiempo real. No obstante, los avances en robótica, control digital de procesos y mezclas cementicias adaptadas están impulsando su desarrollo comercial, y cada vez más proyectos a nivel mundial incorporan esta tecnología como parte de estrategias de construcción rápida, eficiente y personalizada.

2.2.3. Medicina y Odontología

La fabricación aditiva ha tenido un impacto profundo en el ámbito médico y odontológico, debido principalmente a su capacidad para producir dispositivos personalizados que se adaptan con precisión a la anatomía de cada paciente. Esta personalización, combinada con la reducción de tiempos y costes respecto a métodos tradicionales, ha favorecido su adopción en clínicas, hospitales y laboratorios de prótesis en todo el mundo [9].

En odontología, tecnologías como SLA y DLP se utilizan ampliamente para fabricar modelos dentales, férulas, alineadores y guías quirúrgicas con alta precisión dimensional y excelente acabado superficial (véase Figura 10). El uso de resinas fotopoliméricas biocompatibles permite obtener piezas listas para uso clínico tras un proceso de curado y limpieza estándar [17].

En el campo médico, la fabricación aditiva se emplea en la creación de implantes personalizados, especialmente en ortopedia, traumatología y cirugía maxilofacial. Tecnologías como SLM y EBM permiten fabricar implantes metálicos en titanio o aleaciones de cobalto-cromo, con estructuras porosas que mejoran la osteointegración y reducen el peso del implante. Además, la impresión de modelos anatómicos a partir de imágenes médicas (CT o MRI) facilita la planificación quirúrgica personalizada, mejorando la precisión del procedimiento y reduciendo riesgos intraoperatorios [17].

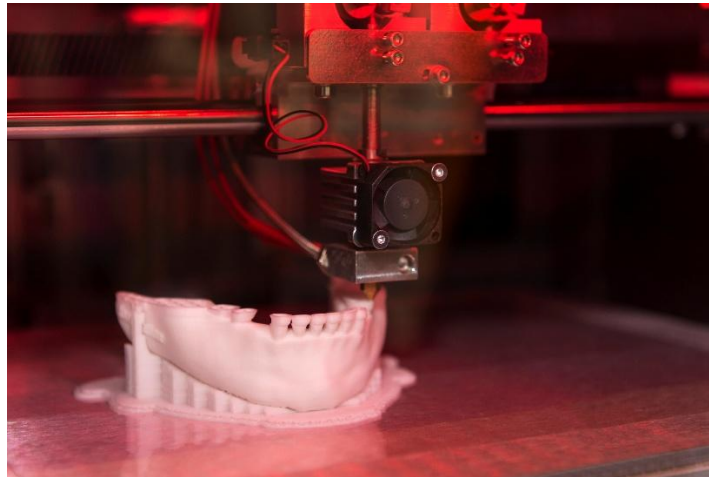


Figura 10. Ejemplo del Uso de la Impresión 3D en Odontología [26].

Una línea de desarrollo emergente es la bioimpresión, centrada en la fabricación de tejidos vivos mediante la deposición de capas de biomateriales e incluso células. Aunque todavía en fase experimental, esta tecnología abre la puerta a aplicaciones como la regeneración de tejidos, pruebas farmacológicas sin animales o incluso la futura fabricación de órganos funcionales [17].

La combinación de personalización, precisión y compatibilidad biológica posiciona a la fabricación aditiva como una herramienta clave en la transición hacia una medicina personalizada, mínimamente invasiva y más eficiente.

2.2.4. Sector Aeroespacial y Defensa

El sector aeroespacial ha sido uno de los principales impulsores del desarrollo y adopción de la fabricación aditiva, debido a la necesidad de producir componentes ligeros, resistentes y altamente optimizados. La capacidad de esta tecnología para generar geometrías complejas que serían imposibles o muy costosas de fabricar mediante métodos tradicionales ha llevado a su integración en múltiples etapas del diseño y la producción aeronáutica [9].

Una de las principales ventajas en este sector es la posibilidad de reducir significativamente el peso de los componentes, sin comprometer su integridad estructural, mediante el uso de optimización topológica. Esta reducción de peso se traduce directamente en ahorro de combustible, mejora de la eficiencia operativa y menor impacto ambiental en aeronaves y satélites.

Tecnologías como SLM y EBM se utilizan ampliamente para fabricar componentes metálicos en aleaciones de alto rendimiento, como Inconel, titanio (Ti-6Al-4V) y aleaciones de aluminio. Estas piezas se integran en sistemas de propulsión, soportes estructurales, ductos de refrigeración y otros elementos expuestos a condiciones extremas de temperatura y carga. La resistencia a la fatiga y la posibilidad de controlar microestructuras mediante tratamientos térmicos postimpresión son factores clave en su aceptación por agencias espaciales y fabricantes aeronáuticos [17].

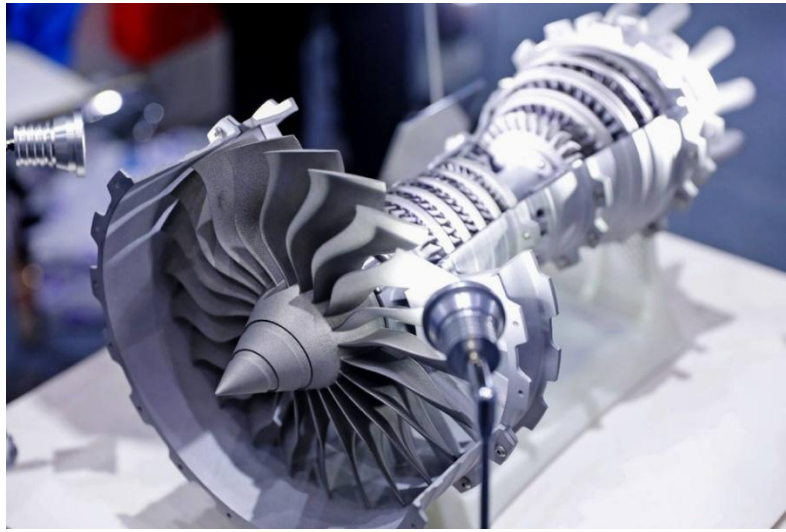


Figura 11. Ejemplo del Uso de la Impresión 3D en el Sector Aeroespacial [27].

En el ámbito de la defensa, la fabricación aditiva permite fabricar bajo demanda piezas críticas en entornos de despliegue, facilitando el mantenimiento de vehículos, drones o sistemas de armamento sin depender de cadenas logísticas complejas. Asimismo, se exploran aplicaciones en diseño de armamento personalizado, componentes balísticos y sistemas de camuflaje con geometrías adaptativas, aprovechando la libertad de diseño propia de la impresión 3D [17].

La validación de materiales, certificación de procesos y trazabilidad son aún retos importantes para su adopción masiva en aeronáutica comercial y defensa, pero la evidencia empírica y las pruebas de vuelo acumuladas han consolidado a la fabricación aditiva como una tecnología estratégica en estos sectores de alta exigencia.

2.2.5. Moda, Arquitectura y Diseño

La fabricación aditiva ha encontrado aplicaciones innovadoras en sectores creativos como la moda, la arquitectura y el diseño industrial, donde la libertad geométrica y la capacidad de personalización extrema permiten explorar nuevas estéticas, funciones y experiencias de usuario que no serían viables mediante procesos convencionales.

En el ámbito de la moda, diseñadores y marcas han utilizado tecnologías como FDM, SLS y SLA para crear accesorios, calzado (véase Figura 12), e incluso tejidos flexibles a partir de estructuras geométricas complejas. El desarrollo de materiales flexibles, como TPU y elastómeros específicos para impresión 3D, ha permitido confeccionar piezas portables con propiedades funcionales y estéticas únicas. Grandes firmas deportivas, por ejemplo, han adoptado la impresión 3D para optimizar la amortiguación y personalización de las suelas de zapatillas mediante estructuras generadas algorítmicamente [17].



Figura 12. Ejemplo del Uso de la Impresión 3D en el Sector Minorista [28].

En el campo de la arquitectura, la impresión 3D se emplea principalmente para la creación de modelos a escala, maquetas conceptuales y presentaciones de diseño. Tecnologías como Binder Jetting y SLA permiten fabricar representaciones tridimensionales altamente detalladas, incluyendo texturas, colores y elementos estructurales, lo que facilita la comunicación con clientes e inversores. Estos modelos pueden integrarse con datos BIM (*Building Information Modeling*), favoreciendo la planificación integral de proyectos arquitectónicos [21].

El diseño industrial también ha sido transformado por la fabricación aditiva, especialmente en la fase de conceptualización de productos. La posibilidad de imprimir prototipos ergonómicos, ensamblajes funcionales o versiones estéticas en pocos días permite a los diseñadores evaluar iterativamente aspectos visuales, táctiles y funcionales sin depender de procesos de mecanizado o inyección plástica. Además, el uso de impresión 3D en productos finales de edición limitada, como lámparas, muebles u objetos decorativos, ha generado nuevas oportunidades de mercado y modelos de negocio basados en producción bajo demanda [9].

La convergencia entre creatividad, tecnología y fabricación digital en estos sectores ha ampliado considerablemente los horizontes del diseño, consolidando la impresión 3D como herramienta expresiva, funcional y productiva en industrias tradicionalmente alejadas del entorno industrial.

2.2.6. Joyería

La industria joyera ha adoptado la fabricación aditiva como una herramienta clave para innovar en diseño, reducir tiempos de desarrollo y producir piezas altamente personalizadas con gran precisión. Esta tecnología permite a los diseñadores crear geometrías complejas que resultan difíciles o imposibles de obtener mediante técnicas tradicionales como el esculpido manual o la fundición por cera perdida. Tecnologías como la estereolitografía (SLA) y el microestereolitografía (μ SLA) son especialmente relevantes en este sector por su alta resolución y excelente acabado superficial [9], [17].

Uno de los usos más extendidos es la fabricación de modelos maestros para fundición a la cera perdida. En este proceso, se imprime un modelo de la joya en resina calcinable, que luego se emplea para crear un molde cerámico donde se fundirá el metal precioso (véase Figura 13). Este enfoque combina la libertad geométrica del diseño digital con la precisión de la fundición tradicional, permitiendo una mayor creatividad sin aumentar los costes de producción [9].



Figura 13. Ejemplo del Uso de la Impresión 3D en Joyería [29].

Además, la impresión 3D ha abierto la puerta a la creación directa de piezas en metales preciosos mediante tecnologías como Selective Laser Melting (SLM) o Direct Metal Laser Sintering (DMLS), utilizando materiales como oro, plata, platino o aleaciones específicas para joyería. Estas técnicas permiten fabricar series limitadas o incluso piezas únicas sin necesidad de moldes, lo que resulta ideal para mercados personalizados, colecciones exclusivas o pedidos bajo demanda [11], [17].

La fabricación aditiva también ha potenciado la digitalización del sector joyero, permitiendo integrar herramientas de CAD avanzadas, simulaciones estructurales y algoritmos generativos en el proceso creativo. Gracias a esta sinergia entre diseño computacional e impresión 3D, es posible desarrollar estructuras reticuladas, entramados orgánicos o superficies texturizadas con un nivel de detalle sin precedentes [9]. Esto ha dado lugar a un nuevo lenguaje estético en la joyería contemporánea, más cercano a la arquitectura o al arte generativo, que responde a las demandas de consumidores en busca de exclusividad e innovación [17].

La sostenibilidad es otro aspecto donde la fabricación aditiva ofrece ventajas, al minimizar el desperdicio de metales preciosos y reducir los pasos intermedios del proceso productivo. En un contexto donde la trazabilidad y la ética de los materiales son cada vez más valoradas por los consumidores, estas capacidades fortalecen la competitividad de las marcas que adoptan tecnologías aditivas [19].

2.2.7. Alimentación y Gastronomía

La aplicación de la fabricación aditiva en el sector alimentario representa una de las áreas más innovadoras y con mayor potencial de desarrollo. A diferencia de los sectores

tradicionales, donde predominan materiales como polímeros, metales o cerámicas, la impresión 3D de alimentos se basa en la extrusión de mezclas comestibles, generalmente en forma de pastas, geles o suspensiones, para crear estructuras tridimensionales comestibles capa a capa [1], [13].

Una de las principales ventajas de esta tecnología es la posibilidad de personalizar la forma, textura y composición nutricional de los alimentos (véase Figura 14). Esto la hace especialmente útil en ámbitos como la nutrición personalizada, la alimentación hospitalaria, la cocina de autor o la educación alimentaria. Por ejemplo, es posible adaptar una receta a las necesidades dietéticas de un paciente —como la reducción de azúcares, la incorporación de proteínas vegetales o la adición de micronutrientes— sin alterar el proceso de impresión [22], [15].



Figura 14. Ejemplo del Uso de la Impresión 3D en Alimentación [30].

Además, la impresión 3D permite aprovechar subproductos alimentarios y residuos agrícolas, convirtiéndolos en ingredientes funcionales para la creación de nuevos productos, lo que contribuye a la sostenibilidad de la cadena alimentaria. En este sentido, se ha demostrado que vegetales imperfectos, cereales excedentarios o derivados de procesos de transformación agroalimentaria pueden revalorizarse mediante mezclas aptas para extrusión [31].

Desde el punto de vista técnico, el proceso se basa mayoritariamente en tecnologías derivadas del FDM, adaptadas a materiales pastosos mediante sistemas de extrusión neumática o por pistón, con control preciso de parámetros como la viscosidad, temperatura, presión y velocidad de deposición. Este enfoque requiere un conocimiento profundo de las propiedades reológicas del alimento, ya que la capacidad de mantener la forma tras la extrusión y durante el posprocesado (refrigeración, horneado, secado) es clave para la calidad final del producto [13].

La impresión 3D de alimentos no solo está transformando el concepto de presentación y diseño culinario, sino que también abre nuevas posibilidades en la automatización de la preparación de alimentos, en combinación con tecnologías como la robótica y la

inteligencia artificial, lo que podría cambiar radicalmente la forma en que se produce y consume comida en el futuro.

2.3. Impacto Sostenible de la Fabricación Aditiva

La fabricación aditiva no solo representa una innovación en términos de diseño y personalización, sino que también tiene un potencial significativo para mejorar la sostenibilidad ambiental, económica y social de los sistemas productivos. En comparación con los métodos tradicionales de fabricación sustractiva, donde se elimina material para obtener la geometría deseada, la fabricación aditiva se basa en el principio opuesto: añadir únicamente el material necesario, lo que reduce drásticamente los residuos generados durante el proceso de producción [17].

Desde una perspectiva ambiental, una de las contribuciones más destacadas de la impresión 3D es la optimización del uso de materiales. En tecnologías como FDM, SLS o SLM, el material no utilizado puede ser, en muchos casos, reciclado y reutilizado, especialmente en el caso de polímeros termoplásticos y polvos metálicos que no han sido expuestos a fusión o contaminación. Esto no solo disminuye la generación de desechos, sino que también reduce la extracción de materias primas y el consumo energético asociado a los procesos tradicionales [19].

Además, la fabricación aditiva permite una descentralización de la producción, posibilitando la fabricación bajo demanda en el lugar de consumo. Esta capacidad elimina la necesidad de transportar grandes volúmenes de productos o piezas desde fábricas centralizadas, lo que conlleva una reducción de la huella de carbono asociada al transporte y al almacenamiento. En sectores como el médico, el aeroespacial o el alimentario, esta proximidad al punto de uso puede traducirse también en una mayor eficiencia operativa y en tiempos de respuesta más cortos [19].

En términos económicos, la fabricación aditiva permite acortar los ciclos de desarrollo de productos, reduciendo los costes asociados a herramientas, moldes y líneas de montaje. Además, al eliminar o reducir etapas intermedias, facilita modelos de producción más ágiles y personalizables. Esta eficiencia puede favorecer a pequeñas y medianas empresas, e incluso a emprendedores individuales, democratizando el acceso a procesos avanzados de fabricación [17].

Desde un enfoque social, la impresión 3D ha mostrado potencial en iniciativas de impacto como la producción de viviendas económicas mediante impresión de hormigón, la fabricación de prótesis a bajo coste para comunidades desfavorecidas o la creación de herramientas adaptadas a personas con discapacidad. Estas aplicaciones demuestran que la fabricación aditiva puede ser un instrumento para promover inclusión, equidad y acceso a tecnología en contextos donde los recursos son limitados [19].

No obstante, también existen desafíos en términos de sostenibilidad. La energía necesaria para ciertos procesos —particularmente los que implican fusión de metales— puede ser elevada, y el reciclaje de algunos materiales, como resinas fotocurables o polvos contaminados, presenta limitaciones técnicas y económicas. Asimismo, la fabricación distribuida plantea interrogantes regulatorios relacionados con propiedad intelectual, control de calidad y trazabilidad de los productos.

En conjunto, la fabricación aditiva representa una oportunidad estratégica para avanzar hacia modelos productivos más sostenibles, siempre que se integren con criterios de eficiencia energética, ecodiseño, economía circular y responsabilidad social.

2.4. Limitaciones de la Fabricación Aditiva

A pesar de su creciente relevancia y potencial transformador, la fabricación aditiva todavía enfrenta barreras importantes que limitan su adopción generalizada. Estas limitaciones pueden clasificarse principalmente en aspectos técnicos y económicos, los cuales deben considerarse cuidadosamente al evaluar su implementación en distintos sectores industriales.

2.4.1. Limitaciones Técnicas

Las tecnologías de fabricación aditiva, aunque avanzadas, aún presentan desafíos importantes en cuanto a rendimiento, fiabilidad y versatilidad. Uno de los principales problemas es la baja velocidad de producción en comparación con procesos tradicionales como el moldeo por inyección o el mecanizado CNC. Aunque algunos sistemas industriales han logrado mejoras en este aspecto, muchas impresoras 3D siguen siendo poco competitivas para producción en masa [17].

La precisión dimensional y calidad superficial también representan limitaciones clave. Si bien tecnologías como la estereolitografía (SLA) y la fusión selectiva por láser (SLM) pueden ofrecer resoluciones elevadas, la mayoría de las piezas impresas requieren etapas adicionales de postprocesado, como curado, tratamiento térmico, pulido o mecanizado, lo que añade complejidad y tiempo al ciclo de fabricación [9].

Otro aspecto técnico relevante es la limitada variedad de materiales compatibles. No todas las tecnologías pueden procesar los mismos materiales, y muchos de los disponibles presentan restricciones en términos de resistencia mecánica, estabilidad térmica o durabilidad. Por ejemplo, las resinas utilizadas en SLA son frágiles y sensibles a la humedad, mientras que los polvos metálicos para procesos como SLM o EBM requieren atmósferas inertes o condiciones de vacío, y pueden ser tóxicos o inflamables [17].

Además, la reproducibilidad de los resultados y el control de calidad en tiempo real siguen siendo un reto, especialmente en aplicaciones donde la fiabilidad es crítica, como en medicina, aeronáutica o alimentación. Estas limitaciones dificultan la estandarización del proceso y su integración en entornos productivos altamente regulados [19].

2.4.2. Limitaciones Económicas y Regulatorias

Desde un punto de vista económico, uno de los principales obstáculos para la adopción de la fabricación aditiva es el alto coste de inversión inicial. Los sistemas industriales avanzados, especialmente los que emplean metales o resinas de precisión, tienen precios elevados tanto por el equipo como por los materiales consumibles. A ello se suman los costes de mantenimiento, calibración, ventilación y gestión de residuos, que no siempre están contemplados en los análisis preliminares [17].

Asimismo, muchas empresas enfrentan la necesidad de formar personal especializado para operar los equipos y diseñar piezas con software de modelado y simulación

específico. Esta curva de aprendizaje puede dificultar la integración de la impresión 3D en empresas con recursos técnicos limitados [19].

Otro aspecto clave es la falta de normativas estandarizadas, lo que representa una barrera importante en sectores regulados como el biomédico, el aeroespacial o el alimentario. La validación de procesos y la certificación de materiales impresos siguen siendo poco homogéneas, lo que genera incertidumbre jurídica y dificultad para cumplir con las exigencias regulatorias. Esta situación también repercute en los seguros, la trazabilidad y la aceptación por parte de clientes finales [19].

Por último, aunque la fabricación aditiva se percibe frecuentemente como una tecnología sostenible, ciertos procesos —como la fusión láser o electrónica de metales— implican altos consumos energéticos, y el reciclaje de materiales contaminados con aglutinantes o fotopolímeros no es siempre viable ni seguro. Estas limitaciones deben ser evaluadas cuidadosamente desde un enfoque de análisis de ciclo de vida para garantizar una implementación realmente sostenible [17].

2.5. Comparativa de Técnicas de Fabricación Aditiva

Con el objetivo de ofrecer una visión global sobre las diferentes tecnologías de fabricación aditiva, a continuación se presenta una síntesis comparativa basada en criterios clave como: precisión, velocidad, coste, compatibilidad con alimentos y grado de madurez tecnológica. Esta comparativa facilita la elección de la técnica más adecuada según las necesidades del producto y del entorno de aplicación.

Técnica	Precisión	Coste	Velocidad	Madurez Tecnológica	Comentarios
Fotopolimerización	Muy alta	Alto	Media	Alta	Ideal para prototipos detallados, no apta para contacto alimentario directo.
Extrusión de Material	Media-Alta	Bajo	Media	Muy Alta	La más utilizada en impresión de alimentos. Buena para personalización y mezclas pastosas.
Fusión en Lecho de Polvo	Alta	Muy Alto	Baja	Alta	Requiere materiales técnicos. Incompatible

					con ingredientes alimentarios.
Inyección de Aglutinante	Media	Medio	Alta	Media	Potencial para polvos comestibles, pero aún en fase exploratoria.
Chorro de Material	Muy alta	Muy Alto	Baja	Alta	Excelente para prototipado estético, sin aplicación alimentaria directa.
Laminado de Láminas	Baja	Bajo	Alta	Media	Uso experimental en láminas comestibles. Baja adopción en alimentación.

Tabla 2. Comparativa de Técnicas de Fabricación Aditiva.

Capítulo 3. Fabricación Aditiva en Alimentación

La fabricación aditiva en alimentación representa una de las vertientes más innovadoras del ámbito tecnológico actual, al combinar ingeniería de materiales, diseño digital y ciencia de los alimentos para crear estructuras comestibles con precisión capa a capa. A diferencia de otros sectores industriales donde la impresión 3D está consolidada, la aplicación de esta tecnología al ámbito alimentario se encuentra aún en una fase emergente, pero con un rápido crecimiento e interés por parte de chefs, investigadores, industrias agroalimentarias y sectores de la salud.

Esta tendencia responde tanto a factores tecnológicos como sociales: la creciente demanda de personalización nutricional, la necesidad de aprovechar subproductos alimentarios, la búsqueda de procesos sostenibles y eficientes, y el interés por nuevas experiencias sensoriales y formas de presentación. La impresión 3D permite modificar la textura, el valor nutricional y la geometría del alimento sin cambiar su composición química básica, lo cual abre oportunidades tanto en gastronomía creativa como en alimentación funcional y dietas clínicas.

Dentro de las tecnologías de impresión aplicadas a alimentos, destaca especialmente la extrusión controlada de materiales pastosos, adaptada a las propiedades físicas y reológicas de ingredientes como el chocolate, masas, purés de vegetales o mezclas proteicas. Esta técnica será el eje principal de análisis en el presente capítulo, con énfasis en sus fundamentos, potenciales aplicaciones y limitaciones específicas.

3.1. Técnicas de Fabricación Aditiva en Alimentación

La impresión 3D de alimentos ha adoptado y adaptado varias tecnologías de fabricación aditiva, aunque la más extendida y técnicamente viable hasta el momento es la extrusión de materiales pastosos. Esta técnica se deriva del modelado por deposición fundida (FDM), pero sustituye el filamento sólido por una mezcla comestible con propiedades reológicas controladas. El material es depositado capa por capa mediante una boquilla conectada a un sistema de presión controlado por software de slicing que define el recorrido y la cantidad de masa a extruir en cada capa [1], [13].

La extrusión se ha consolidado como el enfoque dominante por su versatilidad en cuanto a ingredientes, su facilidad de implementación y su compatibilidad con sistemas abiertos de impresión. Se ha aplicado con éxito a alimentos como chocolate, masas de pan, purés de frutas y verduras, geles de alginato, proteínas vegetales y mezclas ricas en almidón o celulosa. Para asegurar una deposición precisa y estable, es esencial que el alimento presente una viscosidad adecuada, comportamiento pseudoplástico y capacidad de gelificación o solidificación posterior [13].

Desde el punto de vista tecnológico, los sistemas de extrusión pueden clasificarse según su mecanismo de presión (neumático, por tornillo o por pistón) y el tipo de control térmico incorporado (temperatura ambiente, refrigeración activa o calentamiento por resistencia). El chocolate, por ejemplo, requiere un control preciso de la temperatura de fusión y solidificación durante todo el proceso de impresión para mantener su estructura y brillo, lo cual implica adaptar el cabezal de impresión y el lecho a condiciones térmicas específicas [32].

Aunque existen investigaciones sobre la aplicación de otras tecnologías como inyección de aglutinante (Binder Jetting) y estereolitografía de fotopolímeros comestibles, estas siguen siendo experimentales. El uso de Binder Jetting ha sido explorado para imprimir mezclas de almidón con aglutinantes líquidos aptos para consumo, mientras que la fotopolimerización plantea todavía desafíos éticos y toxicológicos relacionados con la ingestión de monómeros fotosensibles, por lo que su adopción está muy limitada [15].

En términos generales, la extrusión controlada ofrece una solución adaptable y escalable, ideal tanto para entornos de investigación como para aplicaciones comerciales en gastronomía, nutrición personalizada o revalorización de subproductos. La clave de su éxito radica en la interacción precisa entre el hardware de impresión, el software de diseño y las propiedades físico-químicas del alimento utilizado.

3.2. Materias Primas Comestibles y Criterios de Aptitud para Impresión 3D

La selección adecuada de los materiales alimentarios es uno de los factores más determinantes para el éxito de la impresión 3D de alimentos. A diferencia de los materiales industriales, los alimentos presentan comportamientos fisicoquímicos y reológicos complejos, que varían en función de su composición, procesamiento previo y condiciones ambientales. Por ello, no todos los ingredientes son directamente imprimibles, y es necesario identificar y ajustar aquellos que presentan propiedades compatibles con la técnica aditiva utilizada, especialmente en procesos basados en extrusión.

Desde el punto de vista funcional, un alimento imprimible debe presentar una viscosidad suficientemente alta para mantener la forma tras la deposición, pero también una fluidez adecuada durante la extrusión. Este equilibrio se encuentra generalmente en materiales con comportamiento pseudoplástico o tixotrópico, es decir, que fluyen bajo presión pero recuperan su estructura una vez cesa la fuerza. Adicionalmente, es fundamental que el material posea capacidad de gelificación o solidificación posterior para conservar la geometría impresa de manera estable [1], [13].

La formulación de las materias primas puede incluir modificadores de textura, espesantes, gelificantes, o agentes estructurantes como almidón, pectina, agar-agar o proteínas. Estos componentes no solo afectan la imprimibilidad, sino también las propiedades sensoriales y nutricionales del producto final. En muchos casos, es necesario un procesamiento previo, como cocción, trituración, mezcla o precristalización, para obtener una textura homogénea y controlada [1], [32].

En los siguientes subapartados se analizan los principales grupos de alimentos que han demostrado ser compatibles con tecnologías de impresión 3D por extrusión. Se describen sus propiedades relevantes, desafíos técnicos asociados y ejemplos de aplicación, comenzando por el chocolate —material protagonista del presente trabajo— y siguiendo con matrices vegetales, frutas y productos cárnicos y marinos.

3.2.1. Chocolate

El chocolate es uno de los materiales comestibles más investigados en el ámbito de la fabricación aditiva (véase Figura 15), debido a su capacidad para fundirse con facilidad y solidificarse rápidamente tras la extrusión.



Figura 15. Aplicaciones del Chocolate en Impresión 3D de Alimentos [33].

Sin embargo, su comportamiento durante la impresión 3D está fuertemente condicionado por su estructura físico-química, composición, comportamiento reológico y estado de cristalización. Comprender estos factores resulta esencial para garantizar la viabilidad del proceso, evitar defectos como el colapso estructural o el *fat bloom*, y optimizar la calidad del producto final [1], [15], [34].

3.2.1.1. Diferencias Funcionales entre el Chocolate Negro y Blanco

Desde el punto de vista composicional, el chocolate negro contiene una mayor proporción de sólidos totales —cacao seco, azúcar, compuestos fenólicos y proteínas—, lo que se traduce en una viscosidad más alta y una estructura más firme. En cambio, el chocolate blanco, que carece de sólidos de cacao y presenta mayor contenido de manteca de cacao y sólidos lácteos, muestra menor viscosidad y funde con mayor facilidad. Sin embargo, esta mayor fluidez también implica una menor capacidad para mantener la forma tras la extrusión, aumentando el riesgo de colapso estructural [32], [13].

Estas diferencias afectan directamente la viabilidad de impresión. El chocolate negro, aunque más exigente en términos de presión de extrusión, ofrece mejor definición geométrica y mayor estabilidad después de haberse depositado. Por su parte, el chocolate blanco requiere un control térmico más preciso y un sistema de enfriamiento más eficiente para preservar la forma deseada durante la solidificación [13].

3.2.1.2. Polimorfismo Lipídico y Precristalización

La manteca de cacao, principal fase grasa del chocolate, presenta un comportamiento polimórfico, lo que significa que puede cristalizar en al menos seis formas distintas (I a VI), cada una con diferentes temperaturas de fusión, estabilidad y textura (véase Tabla 3).

Forma	Temperatura de fusión (°C)	Estabilidad	Observaciones
I	~17	Muy baja	Se funde fácilmente, textura blanda
II	~21	Baja	No contracción uniforme
III	~26	Media-baja	Propensa a bloom
IV	~28	Media	Textura arenosa
V (β_2)	~33	Alta	Brillo, firmeza, contracción adecuada
VI	~36	Muy alta	Formación lenta, textura cerosa

Tabla 3. Polimorfos de la manteca de cacao y sus propiedades.

Entre ellas, solo la forma V (β_2) es considerada óptima para consumo y fabricación aditiva, ya que confiere brillo, firmeza, contracción controlada y una fusión adecuada en boca [32]. Para inducir selectivamente la forma V, es necesario un proceso de precrystalización o templado, que consiste en:

1. Fundir completamente el chocolate (~45 °C).
2. Enfriar hasta inducir la nucleación deseada (~27–28 °C).
3. Recalentar ligeramente a temperatura de trabajo (~31–32 °C para negro, ~29–30 °C para blanco).

Un control inadecuado de este proceso da lugar a estructuras inestables, mala definición de capas y aparición de defectos como *fat bloom* [32], [35].

3.2.1.3. Comportamiento Reológico y su Impacto durante la Impresión

Desde un punto de vista reológico, el chocolate se comporta como un fluido pseudoplástico con esfuerzo de fluencia: necesita una presión inicial para comenzar a fluir, y su viscosidad disminuye a medida que se incrementa el cizallamiento. Este comportamiento es clave para la impresión 3D, ya que permite la extrusión a través de una boquilla y la recuperación de la forma al cesar la presión [13].

El chocolate negro, con mayor contenido de sólidos, presenta mayor viscosidad y esfuerzo de fluencia, lo que ofrece una mejor definición estructural, aunque puede requerir boquillas más grandes o presiones más altas. El chocolate blanco, más fluido, facilita la extrusión pero compromete la precisión geométrica si no se enfría adecuadamente [13], [34].

Los factores que influyen en la reología del chocolate incluyen:

- Tamaño y distribución de partículas sólidas.
- Proporción entre grasa y sólidos.
- Tipo y concentración de emulsionantes (como lecitina).
- Temperatura de trabajo y condiciones de humedad.

Estos parámetros deben optimizarse cuidadosamente para asegurar un flujo estable, capas definidas y buena adhesión interlaminar durante la impresión.

3.2.1.4. *Solidificación y Estabilidad Estructural Postimpresión*

La estabilidad del chocolate tras su deposición es un factor crítico en impresión 3D, especialmente en aplicaciones reales donde las piezas deben conservar su forma, brillo y textura durante periodos variables antes del consumo. Aunque un templado adecuado y una cristalización en forma V ($\beta 2$) proporcionan una base estructural sólida, la conservación del producto impreso depende de múltiples factores físicos y ambientales [1], [34], [35].

Desde el punto de vista estructural, el chocolate impreso puede sufrir deformaciones si no se solidifica completamente tras la extrusión, particularmente en geometrías altas o complejas. En este sentido, el control del enfriamiento inmediato tras la deposición resulta crucial: sistemas de aire forzado, placas refrigeradas o cámaras de impresión con temperatura controlada ayudan a mantener la integridad geométrica y evitar el colapso [15], [35].

Una vez depositado, uno de los principales desafíos es la recristalización desordenada de la grasa, que da lugar al fenómeno conocido como *fat bloom*. Este se manifiesta como manchas blanquecinas en la superficie, y puede ser inducido por:

- Cambios bruscos de temperatura durante el almacenamiento.
- Humedad elevada.
- Uso de chocolate mal templado o mal estabilizado.
- Contaminación por grasas incompatibles (por ejemplo, al mezclar tipos de chocolate).

Además del impacto estético, el *fat bloom* compromete la textura y la percepción sensorial del producto, deteriorando su calidad comercial [32].

Por estas razones, se recomienda almacenar el chocolate impreso a temperaturas estables entre 14 y 18 °C, con una humedad relativa inferior al 50%, y protegido de la luz directa. En caso de almacenamiento prolongado, se aconseja utilizar envases barrera o atmósferas controladas para evitar la absorción de olores o la migración de grasa [34], [36].

En términos de diseño para conservación, se ha observado que estructuras con mayor relación superficie-volumen, como capas finas o paredes delgadas, son más vulnerables a recristalización y pérdida de textura. Por el contrario, formas compactas con base ancha tienden a conservar mejor su estabilidad dimensional, siempre que se mantengan las condiciones ambientales recomendadas [35].

La estabilidad postimpresión es, por tanto, una extensión natural del proceso de impresión 3D, y debe ser tenida en cuenta desde la formulación del material hasta el diseño de la pieza y su conservación.

3.2.2. Matrices Vegetales

En el contexto de una alimentación saludable, sostenible y personalizable, las matrices vegetales representan una alternativa prometedora para la impresión 3D de alimentos, combinando funcionalidad estructural con alto valor nutricional. En este contexto, las matrices vegetales incluyen purés, pastas y suspensiones derivadas de hortalizas, legumbres o algas. Su relevancia en fabricación aditiva radica en su alto valor nutricional, sostenibilidad y versatilidad sensorial. Sin embargo, su comportamiento en 3D está condicionado por su composición acuosa, estructura viscoelástica y capacidad de gelificación o estabilización postimpresión [14].

3.2.2.1. Composición y Características Funcionales

Las matrices vegetales empleadas en impresión 3D alimentaria están compuestas por mezclas de ingredientes funcionales que interactúan para generar una textura viscoelástica adecuada. Estos ingredientes cumplen roles específicos relacionados con la extrusión, la estabilidad estructural y la recuperación de forma.

La Tabla 4 resume los ingredientes funcionales más comunes utilizados en estas matrices vegetales, junto con sus rangos típicos de concentración y su rol en el proceso de impresión 3D:

Ingrediente	Rango típico (% w/w)	Función en impresión 3D
Agua	40–90 %	Plastificante natural que facilita la extrusión, pero disminuye la estabilidad posimpresión
Gomas (xantana, carragena)	0.5–2 %	Aumentan viscosidad y recuperación de forma tras la extrusión
Almidón (arroz, patata)	4–10 %	Refuerzo gelificante; mejora rigidez y definición estructural
Proteínas vegetales	2–5 %	Promueven redes estructurales que aumentan la integridad mecánica
Fibra vegetal	10–30 %	Mejora retención de agua y refuerza la integridad dimensional

Tabla 4. Ejemplos de ingredientes funcionales y sus efectos en matrices vegetales.

Estas matrices consisten en suspensiones acuosas derivadas de hortalizas, legumbres o algas, con contenido de agua típicamente entre el 40 % y el 90 % en peso. Esta proporción alta reduce la viscosidad y el esfuerzo de fluencia, lo que facilita la extrusión; sin embargo, eleva el riesgo de colapso estructural tras la deposición debido a la disminución de la recuperación de forma y la tendencia al flujo por gravedad o flujos capilares internos [37], [38].

Para paliar esta debilidad, se añaden materias primas funcionales que proporcionan estructura mediante la formación de redes biofísicas. Las gomas como la xantana o el

carragenano (0,5–2 % w/w) aumentan la viscosidad y favorecen la recuperación elástica del material al salir de la boquilla, lo que mantiene la fidelidad geométrica de las capas impresas [14]. Asimismo, el almidón en rangos de 4–10 % w/w, proveniente de fuentes vegetales como el arroz o la patata, refuerza la estructura al gelatinizarse bajo temperatura, incrementando la rigidez posimpresión [39].

Por su parte, las proteínas vegetales (2–5 % w/w) contribuyen a formar redes estructurales que refuerzan la integridad mecánica de las piezas impresas [39]. Cuando el contenido de agua sobrepasa el 60 % en peso, el sistema se vuelve demasiado fluido y pierde forma, mientras que por debajo del 40 % se dificulta la extrusión y puede haber obstrucción de la boquilla [37].

La combinación de agua, hidrocoloides, almidón y proteínas convierte una suspensión blanda en una matriz viscoelástica con comportamiento pseudoplástico. Bajo presión la mezcla fluye fácilmente, pero al cesar la fuerza recupera su rigidez gracias a la interacción polimérica, lo cual es esencial para preservar la forma deseada tras la impresión [38].

3.2.2.2. Comportamiento Reológico y su Impacto durante la Impresión

El comportamiento reológico de las matrices vegetales resulta determinante en la impresión 3D, ya que influye directamente en su extrudabilidad y en la precisión de la forma final. Estos sistemas suelen exhibir un comportamiento no newtoniano pseudoplástico, lo que implica una reducción de la viscosidad al aplicarse esfuerzo —facilitando el paso por la boquilla— seguido de una recuperación de la rigidez estructural una vez que se detiene la presión, contribuyendo así a mantener la estabilidad de las capas depositadas [40], [41].

Un parámetro clave es el esfuerzo de fluencia (τ_y), que representa la tensión mínima necesaria para iniciar el flujo del material. Valores demasiado altos dificultan la extrusión, mientras que valores demasiado bajos resultan en estructuras inestables tras la deposición [40], [41]. Por ello, la formulación debe lograr un balance que permita un flujo fluido bajo presión sin comprometer la integridad de la impresión.

Otra característica esencial es el comportamiento pseudoplástico, donde la viscosidad disminuye con una mayor tasa de cizallamiento. Esto es especialmente ventajoso en impresión 3D porque permite que el material fluya fácilmente dentro de la boquilla pero luego recupere rigidez una vez depositado [41].

La recuperación estructural también es relevante: determina qué tan rápido puede el material recuperar su forma tras la impresión. Los materiales con una recuperación rápida suelen permitir una mayor precisión geométrica, especialmente en estructuras con cambios de dirección o interrupciones durante el proceso [41].

El módulo de almacenamiento (G'), aunque menos común en formulaciones alimentarias generales, ha sido empleado en investigaciones para cuantificar la firmeza post-extrusión y estimar la estabilidad mecánica de la pieza. Aun así, en tu caso, basta con observar si la masa recupera su forma completa tras desplazarse por la boquilla y depositarse, lo cual es un buen indicador práctico de G' sin necesidad de medidas dinámicas.

En alimentos como el puré de patata, se ha demostrado que la adición de almidón o gomas incrementa tanto τ_y como la viscosidad en estado reposo, mejorando la estabilidad

posimpresión; sin embargo, requiere mantener niveles equilibrados ($\approx 6\text{--}8\%$ de almidón) para conservar una extrudabilidad adecuada [40].

En formulaciones complejas (hasta nueve componentes, incluyendo almidón y proteínas), se comprueba que el contenido de polisacáridos refuerza la estructura, pero su exceso puede provocar obstrucción en la boquilla. En dichos casos, la inclusión de hidrogeles—como xantano o carragenano—ayuda a modular el flujo y mejorar la cohesión sin complicaciones durante la extrusión [41].

En resumen, una formulación vegetal ideal mantendrá un adecuado esfuerzo de fluencia, mostrará un claro comportamiento pseudoplástico y presentará una rápida recuperación de forma. Estos requisitos permiten obtener una extrusión continua, capas definidas y una adherencia interlaminar óptima.

3.2.2.3. Solidificación y Estabilidad Estructural Postimpresión

Después de la deposición, la estabilidad de las estructuras vegetales impresas depende tanto del proceso de solidificación inmediato como de la forma en que se conservan antes del consumo o utilización. Dado que estas matrices suelen contener elevados porcentajes de agua y polisacáridos termosensibles, se establecen dos estrategias principales para consolidar la forma.

Por un lado, la gelificación o coagulación inmediata, inducida por la presencia de gomas (como xantano o carragenano) o proteínas vegetales (como las de guisante o soja), resulta esencial para estabilizar la forma tras la extrusión. Estas sustancias reaccionan frente a estímulos como la temperatura, el pH o la presencia de iones divalentes (por ejemplo, calcio), formando redes tridimensionales que detienen el flujo del material y fijan su geometría en cuestión de segundos o minutos tras la deposición [41]. Este mecanismo resulta especialmente crítico en el caso de geometrías complejas, con voladizos o estructuras que no pueden sustentarse por sí solas en estado semilíquido.

Por otro lado, la reducción del contenido hídrico mediante postprocesos constituye una técnica complementaria para mejorar la rigidez y durabilidad de las piezas. Una vez finalizada la impresión, se pueden aplicar procesos de secado por aire caliente, horneado suave, deshidratación parcial o enfriamiento asistido. Estas técnicas permiten disminuir el contenido de agua libre, lo que reduce la plasticidad del sistema y aumenta su estabilidad dimensional. No obstante, su aplicación debe ser cuidadosamente controlada, ya que un secado excesivo puede inducir encogimiento, formación de grietas o colapso estructural del volumen depositado, afectando negativamente la calidad del producto final [41].

Un estudio de «appetizer cakes» elaborados con puré de zanahoria confirmó que, sin refuerzo de gelificación ni enfriamiento postimpresión, la estructura se relajó y perdió definición al cabo de pocas horas [42]. En contraste, piezas tratadas con protocolos suaves de calentamiento más secado intermitente conservaron geometrías limpias, buena textura y aceptabilidad sensorial.

Otro factor clave es el contenido y tipo de polisacáridos estructurantes. Las matrices con almidón parcialmente gelatinizado proporcionan rigidez térmica, mientras que las gomas ofrecen elasticidad inmediata, y las proteínas aportan resistencia en el estado sólido. Esta

combinación es especialmente útil en formulaciones con >30 % agua, donde solo el enfriamiento no garantiza formas estables [41].

En el caso de estructuras complejas, el diseño del *infill* (densidad y patrón interno) también influye en la sostenibilidad posimpresión, pues las estructuras huecas con densidad adecuada (≥ 50 %) soportan mejor su propio peso y evitan colapso por flujo interno o humedad localizada [43].

3.2.3. Geles de Frutas

Los geles de frutas han emergido como una opción innovadora para la impresión 3D de alimentos, gracias a su capacidad de formar estructuras suaves, estables y altamente personalizables a partir de purés o jugos enriquecidos con agentes gelificantes. Su elevada aceptación sensorial, combinada con un perfil nutricional atractivo y una capacidad natural de gelificación, los convierte en materiales idóneos para aplicaciones que requieren precisión geométrica y texturas moldeables. Además, su comportamiento funcional puede ajustarse fácilmente mediante la modulación del contenido en azúcares, pectinas, almidón o gomas naturales. Estos atributos hacen de los geles de frutas una matriz versátil tanto para investigación como para aplicaciones gastronómicas avanzadas.

3.2.3.1. Composición y Características Funcionales

Los geles de frutas se han consolidado como una matriz versátil en impresión 3D debido a su capacidad natural de gelificación y su perfil sensorial atractivo. Los geles de frutas utilizados en impresión 3D se elaboran a partir de purés, jugos concentrados o mezclas reconstituídas, combinados con agentes gelificantes para obtener una matriz viscoelástica capaz de mantener la forma deseada tras la deposición. La composición base incluye agua (mayoritaria), azúcares naturales (fructosa, glucosa, sacarosa), ácidos orgánicos (cítrico, málico), fibra soluble e insoluble, así como compuestos fenólicos con propiedades funcionales adicionales [1], [44].

Desde el punto de vista funcional, el componente crítico para la estructura es la pectina, un polisacárido presente en la pared celular de las frutas. Su concentración natural varía ampliamente según la especie y el grado de madurez: por ejemplo, manzana y cítricos contienen hasta un 1.5 % p/p de pectina, mientras que frutas como fresa o plátano requieren adición externa para lograr una gelificación adecuada [41]. La gelificación pectínica depende del pH, la concentración de sólidos solubles ($^{\circ}\text{Brix}$) y la presencia de iones calcio (en el caso de pectinas de bajo metoxilo), lo que permite modular la rigidez del gel en función del diseño de impresión [45].

Otro ingrediente común en formulaciones imprimibles es el almidón modificado, cuya gelatinización bajo calor contribuye a la formación de una matriz densa con buena retención de forma. Este puede añadirse en concentraciones de 3–6 % p/p para mejorar la rigidez sin comprometer la extrudabilidad [46]. También se emplean gomas naturales, como agar-agar, goma guar o goma xantana, en proporciones entre 0.2 y 1.5 % p/p para estabilizar suspensiones con alto contenido en agua y controlar la sinéresis [47].

Las frutas con alto contenido en agua (>85 %) y baja acidez (por ejemplo, melón o sandía) tienden a generar geles inestables sin la adición de agentes estructurantes. En cambio, frutas como el mango, el plátano o la manzana, con mayor proporción de sólidos solubles

y fibra dietética, muestran mejor comportamiento gelificante y mayor estabilidad dimensional postimpresión [41], [47].

La funcionalidad de los geles de frutas también puede reforzarse con proteínas vegetales o colágeno hidrolizado, que mejoran la elasticidad y la resistencia mecánica de la pieza final, aunque su uso sigue siendo más común en aplicaciones funcionales o dietéticas específicas [44].

A continuación, se muestra en la Tabla 5 en síntesis los componentes de geles.

Ingrediente	Rango típico (% w/w)	Función principal
Agua	70–90 %	Facilita extrusión; requiere gelificación posterior
Pectina (HM o LM)	0.5–2.5 %	Gelificante principal; aporta firmeza estructural
Azúcar	10–30 %	Estabiliza geles HM; modifica textura y sabor
Ácidos orgánicos (cítrico, málico)	0.2–1 %	Ajustan pH óptimo para gelificación
Gomas (xantana, guar)	0.2–1.5 %	Aumentan viscosidad; mejoran cohesión estructural
Almidón modificado	2–5 %	Refuerza rigidez y estabilidad mecánica

Tabla 5. Ejemplos de ingredientes funcionales y sus efectos geles de frutas.

En síntesis, la composición óptima de un gel de fruta para impresión 3D incluye una base frutal homogénea, elevada proporción de sólidos solubles, agentes gelificantes ajustados a pH y contenido iónico, y, en ciertos casos, almidones o proteínas para reforzar la estabilidad estructural.

3.2.3.2. Comportamiento Reológico y su Impacto durante la Impresión

El comportamiento reológico de los geles de frutas determina su viabilidad como material de impresión 3D, especialmente en estructuras que requieren precisión y estabilidad dimensional. En general, estos sistemas presentan una viscosidad intermedia y un comportamiento pseudoplástico moderado, derivados tanto de la matriz líquida (jugos o purés) como de los agentes gelificantes añadidos, como pectina, agar, goma guar o almidón modificado [45], [48].

Un parámetro crítico es el tiempo de gelificación, ya que influye directamente en la capacidad de la estructura para estabilizarse tras la extrusión. Las pectinas de alto metoxilo, por ejemplo, requieren un entorno ácido ($\text{pH} < 3.5$) y una concentración de azúcares elevada ($> 55\%$) para formar una red efectiva, mientras que las pectinas de bajo metoxilo pueden gelificar en presencia de iones calcio, incluso con bajo contenido en

azúcar, lo que las hace más adecuadas para formulaciones funcionales y de bajo índice glucémico [45], [47].

La viscosidad debe mantenerse en un rango que permita un flujo continuo pero controlado a través de la boquilla (10^2 – 10^3 Pa·s), y el esfuerzo de fluencia debe ser suficiente para mantener la estructura sin colapsar. En formulaciones óptimas, el gel puede fluir bajo presión y recuperarse rápidamente una vez depositado, asegurando la fidelidad del diseño digital [38], [48].

La adición de emulsionantes o proteínas (como caseinato de sodio o proteínas de soja) puede mejorar la estabilidad interfacial y modular la reología, particularmente en sistemas complejos que combinan pulpas con partículas sólidas (como semillas o fibras) [54]. Por último, la temperatura de trabajo también modula la viscosidad y elasticidad del gel: mientras el agar solidifica al enfriar, la pectina requiere calentamiento controlado durante la preparación, lo cual implica ajustar el sistema de impresión a las propiedades térmicas del gel elegido [14], [48].

3.2.3.3. *Solidificación y Estabilidad Estructural Postimpresión*

La estabilidad postimpresión de los geles de frutas depende fundamentalmente del tipo de agente gelificante empleado, del contenido de agua y azúcares, y de las condiciones físico-químicas a las que se somete el sistema tras la deposición. A diferencia de otras matrices comestibles, los geles frutales pueden consolidarse estructuralmente mediante mecanismos térmicos, iónicos o de enfriamiento, lo que permite adaptar su comportamiento a los requisitos geométricos y sensoriales del producto final [41], [45].

En formulaciones basadas en pectina de bajo metoxilo, la gelificación se produce por la presencia de iones divalentes, como el calcio, que promueven enlaces cruzados entre cadenas poliméricas de pectina, generando redes tridimensionales firmes y estables incluso a temperatura ambiente. Este proceso puede acelerarse mediante la incorporación controlada de fuentes de calcio, como lactato cálcico o gluconato cálcico, bien sea antes o después de la impresión [47]. Esta estrategia es especialmente útil para piezas con geometrías complejas o múltiples capas, ya que permite una consolidación gradual sin necesidad de intervención térmica agresiva.

Por otro lado, gelificantes térmicos como el agar o ciertas formas de almidón modificado requieren enfriamiento tras ser extruidos en caliente. En estos casos, la solidificación se logra reduciendo la temperatura por debajo del punto de transición de gel, lo que implica el uso de placas refrigeradas o atmósferas frías en la cámara de impresión. Este método permite una fijación rápida de la forma, aunque plantea desafíos en la uniformidad del enfriamiento, especialmente en piezas voluminosas o con rellenos densos [14], [41].

El contenido de agua es también un factor crítico. Por encima del 75 % de humedad, la estructura impresa tiende a desmoronarse con el paso del tiempo si no se estabiliza mediante enfriamiento rápido o gelificación química. Para mejorar la durabilidad, algunos estudios proponen aplicar un secado suave (aire caliente a 40–50 °C) posterior a la impresión, lo que reduce la actividad del agua sin comprometer la textura ni el sabor [43], [48].

Adicionalmente, el diseño estructural influye en la sostenibilidad geométrica: las piezas impresas con patrones de relleno denso ($\geq 60\%$) y capas de espesor uniforme muestran mayor resistencia a la deformación postimpresión que aquellas con voladizos o infills huecos [43]. Esta consideración es clave en alimentos dirigidos a usuarios con requerimientos específicos, como en el caso de productos impresos para pacientes con disfagia, donde la textura y la estabilidad estructural son determinantes para la seguridad alimentaria [4], [49].

En resumen, la estabilidad estructural de los geles de frutas tras la impresión puede garantizarse mediante la elección adecuada de gelificantes, el control de humedad, el uso de procesos de enfriamiento o secado adecuados, y un diseño geométrico optimizado. Estas estrategias aseguran la conservación de la forma, la calidad sensorial y la funcionalidad nutricional del producto final.

3.2.4. Carnes y Pescados

La impresión 3D de carnes y pescados representa una de las líneas de investigación más prometedoras en la fabricación aditiva de alimentos, al permitir la creación de estructuras ricas en proteínas con texturas, formas y propiedades funcionales personalizables. Su aplicación se orienta tanto al desarrollo de productos innovadores para consumidores convencionales como a soluciones específicas para personas con necesidades dietéticas especiales, como pacientes con disfagia o adultos mayores. Además, ofrece una vía para revalorizar subproductos de la industria cárnica y pesquera, contribuyendo así a una economía circular en el sector alimentario [50], [51].

3.2.4.1. Composición y Características Funcionales

Las formulaciones a base de carne o pescado utilizadas en impresión 3D suelen derivar de tejidos animales crudos o parcialmente cocidos que han sido procesados mediante trituración, emulsión o mezclado mecánico intensivo. Estos materiales presentan una composición dominada por proteínas miofibrilares, como la actina y la miosina, que desempeñan un papel estructural clave. Estas proteínas, al ser sometidas a temperaturas entre 50 y 70 °C, sufren desnaturalización y forman redes tridimensionales con capacidad gelificante, confiriendo firmeza al producto tras la cocción o tratamiento térmico posterior a la impresión [52].

Sin embargo, existen diferencias funcionales entre matrices cárnicas y marinas. La carne roja, por ejemplo, contiene mayor proporción de mioglobina, fibras musculares gruesas y grasa intramuscular, lo cual dificulta la extrusión continua y la uniformidad de la deposición. En cambio, los pescados blancos, el surimi y los mariscos presentan una textura más blanda y uniforme, lo que favorece su procesabilidad, aunque con una menor estabilidad estructural si no se incorporan estabilizantes [50], [53].

Para superar estas limitaciones, se emplean aditivos como almidones modificados, proteínas vegetales, gomas (xantana, carragenano, gellan gum) o claras de huevo. Estos agentes funcionales actúan como modificadores de textura, aumentando la viscosidad de la mezcla, favoreciendo la formación de geles térmicos y mejorando la cohesión estructural durante y después de la impresión [50].

Un estudio reciente sobre impresión 3D de surimi demostró que la formulación influye de forma directa en la estabilidad estructural de las piezas. La combinación óptima de almidón, sal y contenido acuoso permitió alcanzar niveles de dureza entre 150 y 415 g/cm² y de adhesividad entre -300 y -115 g, lo que garantizó una impresión precisa incluso en estructuras con ángulos de 45° [53].

3.2.4.2. *Comportamiento Reológico y su Impacto durante la Impresión*

El éxito de la impresión 3D de carnes y pescados depende en gran medida de sus propiedades reológicas, que determinan tanto la extrudabilidad como la estabilidad estructural del producto postimpresión. El comportamiento más relevante en este contexto es el *shear-thinning* o pseudoplasticidad, así como la presencia de un esfuerzo de fluencia (*yield stress*) que permite que el material mantenga su forma una vez cesada la extrusión.

La caracterización rutinaria del material incluye históricos de viscosidad frente a tasa de cizallamiento, esfuerzos de fluencia y módulos de almacenamiento G' y pérdida G'' . Una formulación ideal muestra viscosidad relativamente alta en condiciones de reposo para impedir el colapso, pero esta viscosidad disminuye notablemente bajo esfuerzo, lo que facilita la extrusión a través de boquillas finas [8]. Asimismo, un *yield stress* suficiente impide que el material fluya por gravedad después de ser depositado, garantizando una alta fidelidad geométrica [38].

Estudios sobre surimi y carnes indican que la incorporación de hidrocoloides (xantana, carragenano, gellan) ajusta la pendiente pseudoplástica y eleva tanto el *yield stress* como G' , lo que mejora la impresión de ángulos agudos o estructuras suspendidas [50].

En investigaciones con pasta de tomate como modelo alimentario, se demostró una correlación lineal entre viscosidad a velocidad cero y presión necesaria para la extrusión, así como entre el valor de corte donde $G'=G''$ y la estabilidad de la impresión. Aunque se trata de una matriz distinta, estos hallazgos son transversales a productos basados en carne y ayudan a interpretar su comportamiento extrusivo [13].

Adicionalmente, se ha observado que la recuperación estructural —reflejada en la capacidad de transitar rápidamente de un estado fluido (bajo esfuerzo) a uno sólido (en reposo)— es crítica para prevenir deformaciones entre capas. Estudios recientes muestran que, tras la finalización del cizallamiento, el material debe recuperar al menos 80-90 % de G' en pocos segundos para mantener la geometría impresa sin colapsar [38].

Por último, factores como temperatura de impresión, diámetro de la boquilla y velocidad de deposición interactúan con la reología del material, afectando directamente la presión requerida, la uniformidad del flujo y la resistencia mecánica del objeto final [13].

3.2.4.3. *Solidificación y Estabilidad Estructural Postimpresión*

La etapa posterior a la impresión es fundamental para asegurar que las estructuras de carnes y pescados mantengan su forma, texturas y propiedades funcionales. Tras la deposición, estas piezas suelen someterse a un tratamiento térmico (como cocción, horneado suave o bajo vacío) que induce una red de gelación proteica, cohesión de lípidos y estabilidad mecánica del producto final.

Un estudio reciente sobre pastas cárnicas impresas demostró que, empleando una formulación óptima —10 % de agua y 1,5 % de sal— junto con un relleno interno moderado (fill factor), las muestras impresas en 3D resistieron múltiples métodos de cocción sin colapsar, aunque únicamente las piezas horneadas mantuvieron su forma para estructuras completamente rellenas [54]. Esto indica que el acondicionamiento térmico posterior, especialmente mediante horneado, es clave para consolidar la geometría impresa.

En productos marinos como el surimi, la adición de cloruro cálcico (1,5 g/100 g) favoreció la retención de agua, reforzó la red proteica mediada por geles y mejoró la integridad estructural tras la impresión, permitiendo además una extrusión suave [55]. La capacidad de inducir geles iónicos facilita procesos de coagulación controlada, similar a la pectina de bajo metoxilo.

Los hidrocoloides también desempeñan un papel esencial en la posimpresión: tanto su solubilidad como su estabilidad frente al calor afectan la capacidad del material para mantener la forma durante el calentamiento o enfriamiento final. Concretamente, se ha observado que cuando el módulo de almacenamiento G' permanece mayor que el de pérdida G'' tras el tratamiento térmico, la pieza conserva su rigidez y fidelidad geométrica [50].

Finalmente, el diseño estructural previo a la impresión (por ejemplo, patrones de infill del 50–75 %) influye significativamente en la resistencia mecánica posimpresión. Estructuras internamente densas ofrecen mayor soporte a lo largo de las paredes, mientras que patrones huecos o excesivamente ligeros conllevan riesgo de colapso durante el tratamiento térmico o almacenamiento [56].

En conclusión, para lograr productos impresos en 3D de carnes y pescados con estabilidad estructural, es necesario un enfoque integrado: formulación adecuada (agua, sal, aditivos iónicos), impresión optimizada (geometría e infill), y postprocesamiento térmico (especialmente horneado suave o cocción bajo vacío) enfocado a consolidar la gelación proteica y cohesión lipídica.

3.3. Aplicaciones de la Fabricación Aditiva en Alimentación

La impresión 3D de alimentos ha trascendido las etapas iniciales de laboratorio y se ha integrado en aplicaciones operativas, reales y reconocidas en distintas industrias alimentarias. En la actualidad, esta tecnología permite crear estructuras comestibles personalizadas, precisas y eficientes, impactando cuatro grandes áreas: gastronomía creativa, automatización alimentaria, salud y dietas terapéuticas, y sostenibilidad mediante revalorización de subproductos. En esta sección se presentan casos reales ya implementados en el mundo actual, destacando su utilidad práctica y relevancia actual, sin adelantarnos a proyecciones futuras.

3.3.1. Gastronomía Creativa y Alta Cocina

La impresión 3D en alimentación ya forma parte de la vanguardia gastronómica, usada por chefs y restaurantes de renombre para diseñar presentaciones y sabores que desafían los límites de lo convencional. En Barcelona, los hermanos Torres emplean la impresora Foodini, de Natural Machines, en su cocina de Cocina Hermanos Torres. Este dispositivo

les permite transformar ingredientes de forma sostenible (pescado, restos de verduras, purés) en estructuras sofisticadas y atractivas, facilitando la creatividad culinaria y reduciendo el desperdicio alimentario [57], [58].

Por otro lado, proyectos como Food Ink, una experiencia gastronómica que combina diseño 3D y alta cocina en la mesa impresa directamente con cápsulas alimentarias, han tenido un éxito notable. Chefs como Joel Castanyé y Mateu Blanch, con trayectoria Michelin, han utilizado esta configuración para crear platos con formas geométricas, inspirados en arte, música y naturaleza, además de muebles y vajilla impresos como parte integral de la experiencia [59].

Estos ejemplos actuales demuestran que la impresión 3D aplicada a la gastronomía va más allá del simple elemento decorativo: es una herramienta versátil que integra creativamente la sostenibilidad, la experiencia multisensorial y la eficiencia en cocina profesional, redefiniendo la relación entre el comensal y el alimento.

3.3.2. Automatización Industrial y Personalización Alimentaria

En la actualidad, la impresión 3D de alimentos no solo se utiliza en laboratorios o cocinas experimentales, sino también en procesos industriales a gran escala con enfoque en la personalización del alimento.

Un caso paradigmático es el de Cocuus, una empresa española que lanzó en 2024 la primera línea industrial capaz de producir *bacon* vegetal impreso en 3D, con una capacidad de hasta 1 000 toneladas al año. Su instalación en el norte de España imprime inicialmente 250 kg por hora y distribuye estos productos en más de 400 supermercados Carrefour bajo la marca Foody's. Este caso demuestra que la fabricación aditiva puede integrarse adecuadamente en la cadena de producción tradicional, optimizando tanto volumen como trazabilidad y reduciendo el desperdicio mediante ingredientes de origen vegetal y subproductos de la industria [60].

Más allá de productos vegetarianos, la impresión 3D avanza rápidamente en la creación de alimentos totalmente personalizados. Un ejemplo significativo es Nourished, una empresa que en 2022 introdujo barras de proteína impresas en 3D adaptadas al perfil nutricional del consumidor, ofreciendo más de 420 combinaciones de sabores y nutrientes [61]. La tecnología combina algoritmos, datos biométricos y formulaciones alimentarias ajustadas, abriendo la posibilidad de imprimir barras con macros y micronutrientes diseñados para el entrenamiento físico, los gustos personales o incluso condiciones alimenticias específicas.

También destaca la investigación académica y aplicada que promueve iniciativas colaborativas entre industria y salud pública. Por ejemplo, el instituto holandés TNO, junto con Wageningen University, ha desarrollado un sistema de cocina móvil capaz de imprimir alimentos personalizados —los llamados “Nutri-Bites”— adaptados al consumo calórico, preferencias y requerimientos nutricionales del usuario en tiempo real [62]. Este tipo de prototipos muestran el potencial de la impresión 3D como herramienta de automatización para producir alimentos a la carta en entornos cerrados como gimnasios, hospitales o residencias, mejorando la eficiencia y la inclusión de nutrientes clave.

En resumen, estas aplicaciones actuales combinan automatización e inteligencia alimentaria para producir alimentos personalizados, adaptativos y escalables, lo cual está redefiniendo el potencial de la industria alimentaria tradicional hacia una producción más centrada en el consumidor.

3.3.3. Nutrición y Dietas Terapéuticas

La impresión 3D de alimentos ha cobrado una relevancia real y creciente en entornos sanitarios, transformando la atención nutricional en casos de disfunciones de la deglución, malnutrición o sarcopenia.

En 2024, un equipo liderado por el Centro UWE Bristol desarrolló cenas impresas en 3D con ingredientes como guisantes, yogur griego y aceite de oliva, específicamente diseñadas para pacientes con disfagia. Estas comidas no solo fueron seguras desde la perspectiva de la textura, sino también nutricionalmente completas y visualmente atractivas, con una notable recepción positiva por parte de pacientes y cuidadores [4].

Paralelamente, la empresa neerlandesa Gastronology ha escalado a producción industrial su línea *Dysphalicious*, destinada a pacientes con disfagia. Desde 2024 distribuye comidas impresas bajo estándares IDDSI nivel 4 —textura puré segura— en hospitales y hogares, con capacidad de hasta 700 kg/día y planes de ampliación [63], [64]. Estas comidas, elaboradas a partir de purés de vegetales y proteínas, mantienen forma, sabor y valor nutricional tras congelado y recalentado [64].

Un artículo científico de 2024 evaluó los beneficios de las dietas impresas en 3D en residencias geriátricas. Se desarrollaron "finger foods" (bocados que pueden comerse con una sola mano) con 19–21 g de proteína por cada 100 g, enriquecidos con fibra y micronutrientes como hierro, zinc y selenio. La evaluación sensorial confirmó que estas porciones eran fáciles de manipular, agradables al paladar y seguras para la deglución [65].

Además, revisiones recientes sobre impresión 3D para disfagia indican que el uso de hidrocoloides (como xantana o carragenano) es un componente esencial para ajustar la reología y textura, y que el empleo de marcos como el IDDSI garantiza la adaptabilidad de estas dietas a las necesidades clínicas actuales [66]. Investigaciones específicas demuestran que geles basados en proteína de guisante y xantana permiten imprimir comidas aptas para disfagia nivel 4, con propiedades estructurales y viscoelásticas ajustadas [67].

En conjunto, estas evidencias confirman que la impresión 3D de alimentos ya está siendo utilizada con éxito en hospitales, residencias y clínicas de rehabilitación, permitiendo ofrecer alimentos terapéuticos que combinan seguridad, nutrición y aceptación sensorial en contextos reales.

3.3.4. Revalorización de Subproductos

Una de las contribuciones más relevantes y tangibles de la impresión 3D en alimentación es su capacidad para valorizar subproductos y desperdicios orgánicos, integrándolos en la cadena de producción y reduciendo significativamente el impacto ambiental. Esta aplicación, centrada en el paradigma de la economía circular, convierte residuos —como

cáscaras, pulpas, semillas o tallos— en ingredientes nutritivos e imprimibles, abriendo nuevas oportunidades para snacks, complementos funcionales y alimentos personalizados.

Por ejemplo, Clary et al. (Universidad de Kansas, 2023) desarrollaron snacks impresos en 3D utilizando polvo de brócoli y zanahoria imperfectos. El proceso incluye deshidratación, molienda y formulación con harina, aceite y agua, logrando galletas saludables con vida útil de hasta 25–30 años tras el secado, manteniendo textura y forma durante la impresión y horneado [68].

A nivel académico, un estudio sistemático reciente revisó múltiples casos de impresión 3D usando residuos alimentarios (fruta, verdura, subproductos de la industria pesquera) y concluyó que se pueden reducir entre el 40 % y 60 % los residuos destinados a vertederos, transformándolos en productos alimentarios de valor agregado [69].

Más aún, investigaciones publicadas en 2024 demostraron la conversión de pulpa de frutas y tallos de vegetales en purés imprimibles, evaluando parámetros reológicos, nutricionales y sensoriales. El estudio de MDPI sobre “Valorization of Fruit and Vegetables Industry By-Streams for 3D Food Printing” confirmó la viabilidad de estructuras impresas con propiedades organolépticas aceptables [70].

Estos avances demuestran que, más allá de su novedad tecnológica, la impresión 3D de alimentos se está consolidando como una técnica operativa para reducir desperdicios, introducir subproductos en productos de valor, y fomentar sistemas alimentarios circulares.

Capítulo 4. Desarrollo Experimental

Esta sección recoge el conjunto de ensayos realizados con el objetivo de evaluar la viabilidad de distintos materiales comestibles en procesos de impresión 3D. A lo largo del desarrollo experimental se exploraron diversas formulaciones, estrategias de preparación y parámetros técnicos aplicados tanto a materiales de origen vegetal (como la zanahoria y el brócoli, en sus formas fresca y en polvo) como a ingredientes tradicionales de confitería, como el chocolate negro y blanco.

Los ensayos se estructuraron en función de las propiedades específicas de cada material, priorizando el análisis de su comportamiento reológico, capacidad de extrusión, adherencia entre capas, estabilidad estructural y respuesta al enfriamiento o secado. Asimismo, se introdujeron variantes técnicas (como el uso de distintos gelificantes, agentes texturizantes, o técnicas de enfriamiento rápido) con el fin de optimizar los resultados obtenidos.

El conjunto de pruebas documentadas en esta sección constituye la base empírica del proyecto, y permite establecer conclusiones sobre la viabilidad técnica, los desafíos operativos y las potencialidades de cada formulación en el contexto de la impresión 3D de alimentos.

4.1. Modelado CAD

Para el diseño de las piezas utilizadas en los ensayos de impresión 3D se optó por modelos CAD básicos, diseñados con el programa Solid Edge estratégicamente para facilitar la evaluación de distintos aspectos técnicos del proceso. Estos modelos permitieron experimentar con:

- La altura de capa: Se emplearon formas con paredes verticales de diferentes alturas para analizar la adherencia entre capas sucesivas, observando si la estructura se mantenía estable o tendía a desmoronarse durante o después de la impresión.
- Circunferencias y picos: Se incluyeron elementos circulares y ángulos agudos en los modelos con el fin de comprobar la precisión y exactitud de la impresión. Estos detalles geométricos fueron especialmente útiles para evaluar la resolución del extrusor y el comportamiento del material ante cambios bruscos de dirección.
- Relleno: Algunos modelos incorporaban volúmenes cerrados o zonas de relleno denso para observar el tiempo de secado/enfriamiento requerido según el tipo de material. Esto permitió detectar posibles deformaciones por contracción, así como estimar el tiempo de espera óptimo entre capas o antes de la manipulación del objeto impreso.

La simplicidad de los modelos CAD empleados no compromete su valor analítico, ya que fueron concebidos como herramientas experimentales para maximizar la observación de los factores críticos del proceso de impresión con materiales comestibles.

Todos los modelos desarrollados en CAD y empleados durante los ensayos han sido exportados y preparados para impresión en el software Simplify3D. Para mayor claridad y documentación visual, estos modelos se incluyen en el Anexo B, donde se presenta una

vista previa de cada uno de ellos con sus respectivas dimensiones y características geométricas. Esta recopilación permite entender mejor cómo se tradujeron los diseños digitales en piezas físicas durante las pruebas de impresión 3D con materiales comestibles.

4.2. Caracterización del Chocolate

Los ensayos realizados con chocolate tuvieron como objetivo principal evaluar la viabilidad técnica de este material en procesos de impresión 3D, considerando sus particulares propiedades reológicas y su comportamiento térmico. A lo largo de las pruebas se exploraron diferentes tipos de chocolate (negro y blanco), variables como la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión, el tamaño de las piezas y la interacción entre capas y materiales.

Asimismo, se abordaron aspectos críticos como la precisión dimensional, la adherencia a la base, la estabilidad estructural y el enfriamiento post-impresión, incluyendo la experimentación con técnicas no convencionales, como el uso de nitrógeno líquido. Estos ensayos permitieron identificar los principales desafíos asociados al uso del chocolate como material de impresión, así como estrategias de mejora para futuras aplicaciones.

4.2.1. Evaluación del Comportamiento del Chocolate Negro durante la Impresión

Para evaluar el comportamiento del chocolate negro durante la extrusión, se ha utilizado una formulación comercial de chocolate (Nestlé para Postres, 52 % cacao), compuesta por azúcar, pasta de cacao, manteca de cacao y emulgente (véase Figura 16).



Figura 16. Etiquetado nutricional del chocolate negro fondant Nestlé Postres.

Este tipo de chocolate presenta un contenido graso total del 34,1 %, con un 20,2 % de grasas saturadas, lo que resulta relevante desde el punto de vista reológico. Tal proporción lipídica favorece una viscosidad intermedia con comportamiento *shear-thinning*, condición esencial para la extrusión controlada por boquilla en procesos de impresión 3D [71], [72]. Además, un contenido moderado de manteca de cacao permite mantener una estructura suficientemente estable tras la deposición, sin comprometer la resolución de los detalles geométricos [73].

Estudios recientes demuestran que formulaciones similares permiten preservar la forma del objeto impreso cuando presentan fases lipídicas cristalizadas mayoritariamente en forma V, como se ha mencionado previamente en el apartado 3.2.1.2, lo cual contribuye también a la estabilidad estructural y al endurecimiento rápido tras la extrusión [74], [75].

4.2.1.1. Ensayo 1: Calibración Estructural y Geométrica del Chocolate Negro

4.2.1.1.1. Justificación de Diseño Experimental

El propósito de este primer ensayo fue evaluar de forma preliminar el comportamiento de esta sustancia al ser impresa en una estructura básica. Se buscó observar la adherencia entre capas, la precisión en formas geométricas simples y el tiempo de secado o enfriamiento necesario, con el fin de identificar limitaciones técnicas y guiar los ajustes en formulación y parámetros de impresión de cara a futuros ensayos.

Se utilizó el Modelo B. 1 (véase Anexo B), por su diseño que permite poner a prueba de manera simultánea todos los parámetros fundamentales del proceso de impresión 3D. La figura incluye paredes verticales (para evaluar la adherencia entre capas), zonas curvas (para analizar el comportamiento del extrusor en trayectorias circulares), y esquinas internas definidas (para comprobar la precisión en cambios de dirección). También incorpora una zona rellena que permite observar el enfriamiento, la estabilidad de la estructura y posibles deformaciones.

Al tratarse del primer ensayo, se eligió este modelo por su simplicidad relativa y su valor analítico, con el objetivo de entender bien el funcionamiento del sistema, ajustar parámetros clave y familiarizarse con el proceso antes de continuar con geometrías más complejas.

La mezcla de chocolate fondant fue procesada utilizando una jeringa a una temperatura de 33 °C y una cama refrigerada a 18 °C, con el objetivo de favorecer la solidificación inmediata tras la deposición de cada capa. Esta configuración térmica es coherente con lo señalado por Rando y Ramaioli, quienes demuestran que la estabilidad estructural del chocolate impreso depende críticamente del gradiente térmico entre el extrusor y el entorno de impresión; velocidades de solidificación inadecuadas a temperaturas ambiente superiores a 20 °C pueden provocar colapsos estructurales [73].

Asimismo, se utilizó una velocidad de extrusión de 900 mm/min, dentro del rango identificado como seguro para mantener la fidelidad geométrica de estructuras comestibles, garantizando que el material depositado tenga tiempo suficiente para enfriarse y estabilizarse [71]. Por otro lado, se estableció un ancho de extrusión de 1 mm, correspondiente al diámetro de la boquilla, en línea con lo recomendado por estudios que

muestran que un ancho de extrusión igual al diámetro de salida permite mantener la coherencia del flujo y evitar irregularidades o acumulaciones excesivas de material [72].

4.2.1.1.2. Análisis de Resultados

A partir de los resultados obtenidos, mostrados en la Figura 17, se concluyó que los parámetros iniciales de impresión —basados en configuraciones recomendadas por estudios previos de impresión 3D de chocolate— no resultaron óptimos para la formulación específica utilizada en este trabajo (chocolate negro Nestlé para Postres, 52 % cacao mínimo).



Figura 17. Resultados del Ensayo 1 de Impresión 3D con Chocolate Negro.

En consecuencia, se llevaron a cabo diversos ajustes destinados a mejorar la calidad del proceso de impresión en los siguientes ensayos:

- Aumento de la altura de capa, con el fin de reducir la presión interna durante la extrusión y facilitar el flujo del chocolate, especialmente en formulaciones con menor fluidez.
- Reducción de la temperatura de la jeringa a 31°C, con el objetivo de incrementar la viscosidad del material y mejorar la definición de bordes y contornos, en línea con observaciones previas sobre la relación entre temperatura y estabilidad geométrica [75].
- Disminución de la velocidad de impresión, para permitir una deposición más precisa y un mayor tiempo de estabilización del chocolate antes del siguiente paso.
- Ampliación del tamaño del modelo impreso para permitir una mejor observación de la deposición capa a capa y del comportamiento térmico del material durante toda la impresión.

Como línea de trabajo complementaria, se planteó estudiar el impacto de tratamientos post-impresión, como una etapa de enfriamiento o estabilización térmica, orientados a

favorecer la formación de la forma cristalina V de la manteca de cacao, considerada óptima para mantener brillo, textura y prevenir fenómenos como el *fat bloom* [74].

4.2.1.2. *Ensayo 2: Evaluación de la Temperatura y Velocidad de Extrusión en Piezas de Mayor Escala*

4.2.1.2.1. Justificación de Diseño Experimental

Como continuación del estudio previo y a partir de las limitaciones observadas en el Ensayo 1, se diseñó una nueva prueba con el objetivo de optimizar las condiciones de impresión para mejorar la estabilidad estructural y la definición de las piezas.

En este caso, se implementaron dos ajustes principales: (i) una reducción de la velocidad de extrusión, pasando de 900 mm/min a 720 mm/min (12 mm/s), y (ii) un aumento en la escala del diseño impreso, utilizando el Modelo B. 3. de impresión 3D, que ocupa una mayor superficie de la plataforma de impresión. Esta última medida se justificó con base en la necesidad de observar de forma más clara el comportamiento del chocolate durante el proceso de deposición en estructuras más extensas y continuas.

La elección de una velocidad de extrusión más baja responde a estudios previos que indican que, para chocolates con composiciones grasas convencionales, velocidades excesivas pueden impedir la solidificación inmediata del material y provocar deformaciones [73], [72]. Asimismo, ampliar el tamaño de la pieza permite visualizar con mayor precisión los efectos acumulativos de temperatura, flujo y estabilización térmica a lo largo del tiempo de impresión.

Además, para este ensayo se redujo la temperatura del material a 31 °C con el fin de aumentar ligeramente su viscosidad y mejorar la estabilidad de la estructura tras la deposición. Esta decisión se fundamenta en los resultados de Rando y Ramaioli [73], quienes señalan que temperaturas superiores a 31–32 °C pueden disminuir excesivamente la viscosidad del chocolate, dificultando su solidificación inmediata y comprometiendo la fidelidad geométrica de la pieza impresa.

4.2.1.2.2. Análisis de Resultados

La impresión se realizó con el chocolate procesado a una temperatura interna de 31 °C, mientras que la jeringa mantenía una temperatura de 28 °C. Esta configuración, aunque próxima a los valores recomendados [72], resultó en una mezcla con excesiva fluidez, lo que comprometió la definición de los bordes y la retención de la geometría prevista.

La Figura 18 recoge los resultados obtenidos en esta prueba, que muestran la pieza recién finalizada junto con su apariencia tras una hora de enfriamiento.



Figura 18. Resultados del Ensayo 2.1 de Impresión 3D con Chocolate Negro.

En consecuencia, se planteó que hubiera sido más adecuado esperar a que el chocolate alcanzara una temperatura ligeramente inferior o, en su defecto, configurar directamente una temperatura de impresión menor (27–29 °C), rango que ha demostrado ofrecer una mejor relación entre fluidez y estabilidad en chocolates ricos en grasa [71].

4.2.1.3. Ensayo 2: Optimización Térmica del Chocolate Negro y Análisis de su Comportamiento como Fluido Pseudoplástico

4.2.1.3.1. Justificación de Diseño Experimental

En este ensayo se buscó optimizar el comportamiento del chocolate negro durante la impresión mediante una reducción controlada de la temperatura del material hasta los 30 °C. Esta temperatura fue alcanzada gradualmente, utilizando calentamiento y enfriamiento homogéneo en baño maría para evitar gradientes térmicos que pudieran afectar la viscosidad de forma no controlada. Este enfoque se basa en evidencia experimental que sugiere que un enfriamiento lento y uniforme permite mantener la estructura cristalina deseada (forma V de la manteca de cacao) y mejorar la estabilidad de la mezcla [74], [76].

A diferencia de ensayos anteriores, se redujo el tamaño de la pieza impresa para mejorar el control del flujo y observar con mayor detalle el comportamiento reológico del chocolate en fases iniciales de deposición; se utilizó el Modelo B. 2.. La velocidad de impresión se mantuvo en 720 mm/min (12 mm/s), ya que este valor se encuentra dentro del rango considerado seguro para lograr una deposición estable sin comprometer la resolución [71].

4.2.1.3.2. Análisis de Resultados

Los resultados obtenidos con los nuevos parámetros fueron favorables, como puede apreciarse en la Figura 19.



Figura 19. Resultados del Ensayo 3 de Impresión 3D con Chocolate Negro.

Se evidenció que imprimir el chocolate exactamente a 30 °C permitió obtener mejor definición geométrica y mayor fidelidad estructural en comparación con las impresiones realizadas a 32 °C en ensayos previos.

Esta mejora puede atribuirse a la ligera elevación de la viscosidad a temperaturas más bajas, lo que aumenta la capacidad del material para conservar su forma inmediatamente después de la deposición [73]. No obstante, mantener esta temperatura de forma constante requiere un control térmico riguroso, ya que un descenso excesivo podría conducir a la solidificación prematura del chocolate dentro del sistema de extrusión.

En cuanto al comportamiento durante la extrusión, se observó una respuesta típica de un fluido pseudoplástico, caracterizado por una disminución progresiva de la viscosidad aparente a medida que aumenta la velocidad de cizalla. Aunque este tipo de fluidos no presentan una tensión de fluencia estricta como los materiales de Bingham, sí requieren la aplicación de un esfuerzo inicial suficiente para alcanzar un régimen de flujo estable, especialmente en sistemas con alto contenido de sólidos y estructuración interna. Esta propiedad resulta determinante en impresión 3D, ya que permite mantener la integridad geométrica de la estructura durante las pausas, mientras que bajo condiciones dinámicas, el material fluye adecuadamente para asegurar la continuidad y precisión del proceso.

Por otro lado, se evidenció que imprimir el chocolate exactamente a 30 °C produjo resultados notablemente mejores respecto a geometría y definición, en comparación con impresiones a 32 °C observadas en ensayos anteriores. Esta mejora se explica por la ligera elevación de la viscosidad a temperaturas más bajas, lo que mejora la capacidad del material para mantener su forma al ser depositado. Sin embargo, mantener esta temperatura requiere un control térmico riguroso para evitar que el chocolate solidifique prematuramente dentro del sistema de extrusión.

Finalmente, como medida adicional se propuso refrigerar ligeramente la base de impresión, lo que permitiría una solidificación progresiva del material tras la deposición, mejorando la estabilidad sin comprometer la extrusión.

4.2.1.4. Conclusiones de los Ensayos con Chocolate Negro en Impresión 3D

Los ensayos realizados permitieron identificar los factores clave que condicionan la viabilidad técnica de la impresión 3D con chocolate negro fondant, especialmente en lo relativo a estabilidad estructural, fidelidad geométrica y comportamiento reológico durante la extrusión.

En primer lugar, se evidenció que los parámetros estándar propuestos en la literatura deben adaptarse a cada formulación específica, dado que pequeñas variaciones en la composición del chocolate pueden modificar significativamente su fluidez, capacidad de solidificación y respuesta al esfuerzo de cizalla. En este sentido, el gradiente térmico entre el extrusor y el entorno demostró ser determinante para garantizar una deposición estable y precisa. Se comprobó que temperaturas del chocolate superiores a 31 °C comprometen la definición geométrica, mientras que a 30 °C mejora notablemente la fidelidad de las piezas, sin llegar a inducir solidificación prematura dentro del sistema de extrusión.

Asimismo, la reducción progresiva de la velocidad de impresión y la altura de capa, junto con la ampliación de la escala del modelo impreso, permitió optimizar el control sobre el flujo de material y la observación de fenómenos térmicos a lo largo del proceso.

Finalmente, el comportamiento del chocolate como fluido pseudoplástico con umbral de fluencia fue validado en condiciones controladas, observándose una tensión de fluencia inicial seguida de un flujo progresivamente estable. Esta propiedad es crucial para lograr una deposición continua y precisa en trayectorias complejas.

En conjunto, estos resultados constituyen una base experimental sólida para ajustar con precisión los parámetros operativos en futuras aplicaciones, tanto en geometrías más complejas como en la implementación de tratamientos post-impresión que mejoren la calidad final del producto.

Por todo ello, los parámetros de impresión identificados como más adecuados se resumen a continuación en la siguiente tabla:

Categoría	Parámetro	Valor
Extrusor	Diámetro de la boquilla	1,60 mm
	Ancho de extrusión	1,60 mm
	Velocidad de retracción	300 mm/min
	Distancia de retracción	1,00 mm
Temperatura	Temperatura del extrusor	30 °C
	Temperatura de la cama	18 °C
Capa	Altura de capa	2,00 mm
Velocidades	Velocidad de impresión	720 mm/min (12 mm/s)
Relleno	Porcentaje de relleno interno	80 %
	Patrón de relleno interno	Triangular
Soportes	Porcentaje de relleno del soporte	75 %

Tabla 6. Parámetros de Impresión 3D óptimos para Chocolate Negro.

Para consultar el resto de parámetros técnicos asociados a la impresora y al proceso de impresión, véase la sección A.1 del Anexo A.

4.2.2. Evaluación del Comportamiento del Chocolate Blanco durante la Impresión

Para evaluar el comportamiento del chocolate blanco durante la extrusión, se ha utilizado una formulación comercial de chocolate blanco Nestlé para Postres, compuesta por azúcar, manteca de cacao, leche en polvo, emulgente (lecitinas) y aroma natural de vainilla, como se detalla en la Figura 20.

Este tipo de chocolate presenta un contenido graso total del 34,2 %, con un 21,0 % de grasas saturadas, valores similares en proporción a los del chocolate negro, aunque con diferencias clave en la naturaleza del material.



Figura 20. Etiquetado nutricional del chocolate blanco fondant Nestlé Postres.

A diferencia del chocolate negro, el chocolate blanco no contiene sólidos de cacao ni grasas, lo que implica una menor fracción de partículas suspendidas en la fase continua. Como consecuencia, su comportamiento reológico es más fluido y menos resistente al corte, presentando en muchos casos un perfil cuasi-newtoniano dentro del rango operativo típico de impresión [72], [77].

Estas características hacen que el chocolate blanco sea más fácilmente extruible a temperaturas inferiores, con menor tensión de fluencia y menor viscosidad inicial que el chocolate negro. Sin embargo, esta mayor fluidez también conlleva un mayor riesgo de colapso estructural si no se controla adecuadamente la temperatura de impresión, ya que el material tiende a fluir y deformarse antes de solidificarse por completo [73]. Por ello, resulta fundamental establecer una temperatura de extrusión suficientemente baja (en

torno a 26 °C) que permita mantener una definición geométrica adecuada sin comprometer la fluidez de salida. Además, como ocurre con otras variedades de chocolate, la formación de cristales estables de tipo V sigue siendo esencial para asegurar la integridad estructural y prevenir defectos como el *fat bloom* durante el enfriamiento [74].

4.2.2.1. Ensayo: Calibración Estructural y Geométrica del Chocolate Blanco

4.2.2.1.1. Justificación de Diseño Experimental

Este ensayo constituyó la primera prueba realizada con chocolate blanco, desarrollada como continuación directa del Ensayo 2 con chocolate negro, y empleando el mismo modelo tridimensional (Modelo B. 2) con el fin de facilitar la comparación entre materiales bajo condiciones de impresión equivalentes.

La configuración experimental se diseñó basándose tanto en la literatura científica como en la experiencia adquirida durante los ensayos con chocolate negro, considerando las diferencias fundamentales en su composición. En particular, el chocolate blanco contiene una proporción significativamente mayor de manteca de cacao, lo que reduce su contenido en sólidos suspendidos y confiere al material una menor viscosidad general y una mayor facilidad de extrusión [72].

Inicialmente, se intentó imprimir el chocolate blanco a 22 °C, bajo la hipótesis de que una menor viscosidad favorecería una deposición más definida. Sin embargo, en ese primer intento se observó que el material no fluía adecuadamente, produciendo obstrucciones en la boquilla y una forma distorsionada en la pieza. Este resultado indicó que, a pesar de su mayor contenido graso, el chocolate blanco aún requiere una temperatura mínima que permita un flujo continuo sin comprometer la precisión de impresión.

A partir de esta observación, y basándose en estudios que sitúan el umbral de extrusión ideal para chocolates blancos entre 25–27 °C [71], se ajustó la temperatura del material a 26 °C, utilizando un proceso cuidadoso de calentamiento en baño maría seguido de enfriamiento homogéneo. Esta temperatura permitió alcanzar un equilibrio adecuado entre fluidez y definición geométrica. La velocidad de impresión se mantuvo en 720 mm/min (12 mm/s), como en los ensayos anteriores, y se redujo el tamaño de la pieza para mejorar el control del proceso y permitir una observación más precisa del comportamiento reológico del chocolate blanco.

4.2.2.1.2. Análisis de Resultados

Los resultados obtenidos fueron altamente satisfactorios. El chocolate blanco mostró un flujo continuo, limpio y sin obstrucciones, lo cual confirma su alta extruibilidad a 26 °C. La pieza impresa presentó una excelente definición geométrica, apreciable en la Figura 21, con bordes bien formados y sin colapsos, y pudo ser retirada fácilmente con espátula, sin fracturas ni daños estructurales.



Figura 21. Resultados del Ensayo 3 con Chocolate Blanco.

El comportamiento reológico fue coherente con lo esperado para una mezcla con elevada proporción lipídica: no se observó tensión de fluencia significativa ni retardo en el inicio del flujo, lo que facilitó una deposición constante desde los primeros milímetros de impresión. Este tipo de respuesta ha sido documentada en chocolates con bajo contenido en sólidos suspendidos, donde la fase continua grasa domina el perfil de viscosidad y favorece un comportamiento cuasi-newtoniano a temperaturas moderadas [78].

Si bien se observó que el tiempo de solidificación fue considerablemente mayor (alrededor de 40 minutos), este aspecto no comprometió la integridad de la pieza, lo cual sugiere que el chocolate blanco es particularmente adecuado para aplicaciones que priorizan calidad de forma sobre rapidez de procesamiento.

Este ensayo demuestra que, al adaptar los parámetros térmicos al perfil composicional del chocolate blanco, es posible obtener resultados óptimos en impresión 3D. La experiencia previa con chocolate negro fue clave para definir el rango operativo adecuado, y refuerza la importancia de comprender el vínculo entre la formulación del material y su comportamiento reológico para optimizar los procesos de impresión.

4.2.3. Impresión Multicapa con Chocolate Negro y Blanco

4.2.3.1. *Ensayo: Evaluación de Compatibilidad entre Chocolates Blanco y Negro y Aplicación de Técnicas de Enfriamiento Rápido*

4.2.3.1.1. Justificación de Diseño Experimental

Este ensayo se planteó como una fase avanzada del proceso de optimización, tras haber identificado los parámetros térmicos y de extrusión más adecuados para el chocolate negro (30 °C) y el chocolate blanco (26 °C) en ensayos anteriores. El objetivo fue explorar

la viabilidad de impresiones multicapa combinando ambos tipos de chocolate, así como evaluar la compatibilidad reológica y térmica entre materiales con propiedades contrastantes.

Para ello, se desarrolló un modelo experimental con forma de galleta (Modelo B. 8), que incluía una base de chocolate negro, una galleta tipo María como sustrato intermedio y dos estrellas superpuestas, impresas en chocolate blanco y negro respectivamente. Este diseño permitió estudiar tres aspectos críticos de la impresión 3D de alimentos:

- Adhesión entre capas de diferentes chocolates, con distintos comportamientos reológicos.
- Interacción del chocolate con un elemento alimentario externo (galleta).
- Impacto del enfriamiento rápido entre capas en la estabilidad estructural.

La selección del chocolate blanco (más graso y fluido) y del chocolate negro (más denso y estructural) permitió representar dos extremos dentro del espectro reológico de chocolates de uso común. Tal como se ha descrito en estudios anteriores, el chocolate blanco tiende a comportarse como un fluido cercano a newtoniano, mientras que el chocolate negro presenta un comportamiento más similar al de un fluido de Bingham, con tensión de fluencia inicial que condiciona el arranque de la extrusión.

Asimismo, se introdujo una innovación técnica clave en este ensayo: la aplicación puntual de nitrógeno líquido con el objetivo de acelerar el proceso de solidificación entre capas y evitar deformaciones o mezclas no deseadas durante la construcción multicapa. Esta técnica de enfriamiento ultrarrápido ha demostrado ser particularmente eficaz en el procesamiento de alimentos termosensibles como el chocolate, permitiendo fijar la forma del material inmediatamente tras la deposición, sin necesidad de recurrir a cámaras de refrigeración convencionales.

El uso de nitrógeno líquido (LN₂) en la industria alimentaria está ampliamente respaldado por la literatura debido a su bajo punto de ebullición (-196 °C), que permite una refrigeración extremadamente rápida y localizada sin alterar la composición química del alimento. En el caso de la impresión 3D de chocolates, esta propiedad resulta especialmente útil para preservar la fidelidad geométrica de las capas y mejorar la estabilidad estructural en condiciones donde el control térmico es crítico. Además, al ser un agente criogénico limpio, no tóxico y libre de residuos, el LN₂ es compatible con aplicaciones alimentarias. Según Fasano et al., la congelación asistida con nitrógeno líquido mejora notablemente la retención de textura y la estabilidad dimensional en alimentos impresos, en especial en matrices ricas en grasa como el chocolate blanco o negro [79].

4.2.3.1.2. Análisis de Resultados

Los resultados obtenidos en este ensayo fueron muy alentadores. La combinación de chocolate blanco y negro en una misma impresión fue técnicamente viable, siempre que se respetaran los tiempos de enfriamiento adecuados entre capas y se aplicaran temperaturas de extrusión específicas para cada material.

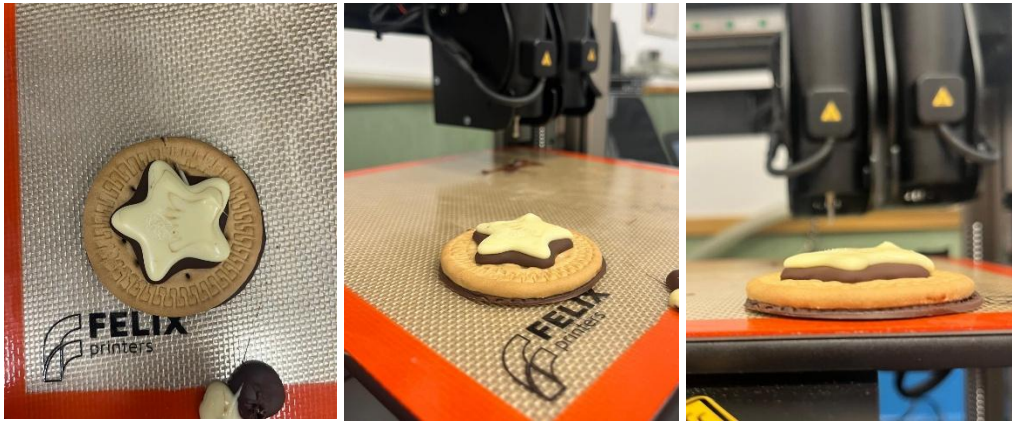


Figura 22. Resultados del Ensayo 4.

La adhesión entre capas heterogéneas resultó ser eficaz, sin separación ni delaminación visible tras el enfriamiento completo, lo que confirma la compatibilidad térmica entre ambos tipos de chocolate cuando se utilizan con un control preciso.

El uso de nitrógeno líquido como técnica de enfriamiento puntual permitió estabilizar instantáneamente la capa impresa, manteniendo la definición de los bordes y la fidelidad geométrica. No obstante, se observó que una aplicación excesiva o descontrolada puede generar microfisuras por contracción térmica abrupta, lo cual resalta la necesidad de desarrollar protocolos de dosificación estandarizados para evitar efectos adversos.



Figura 23. Resultados de la Aplicación del Nitrógeno Líquido.

Desde el punto de vista reológico, el ensayo confirma que el orden de impresión influye significativamente en la calidad del resultado final. Utilizar el chocolate negro como base estructural proporciona mayor rigidez, mientras que aplicar chocolate blanco en capas superiores contribuye a una mejor cobertura y detalle, debido a su mayor fluidez. Esta estrategia está en línea con lo recomendado por investigaciones sobre impresión multicapa de materiales comestibles con perfiles reológicos diferenciados [6], [7].

En conjunto, este ensayo demuestra que la impresión multicapa de chocolates con distintas propiedades físicas es técnicamente viable, y que el uso de métodos complementarios como el enfriamiento con nitrógeno líquido puede ser una solución eficiente en entornos donde no se dispone de refrigeración activa integrada. Esta metodología abre nuevas posibilidades para el desarrollo de productos impresos comestibles con múltiples texturas, sabores y estructuras.

4.2.3.2. Conclusiones de los Ensayos con Chocolate Blanco en Impresión 3D

Los ensayos realizados con chocolate blanco permitieron identificar sus particularidades reológicas y térmicas frente al chocolate negro, demostrando que una correcta adaptación de los parámetros de impresión es esencial para obtener resultados óptimos. A diferencia del chocolate negro, el chocolate blanco presenta una menor proporción de sólidos suspendidos y un mayor contenido graso, lo cual se traduce en un comportamiento más fluido y cercano al perfil cuasi-newtoniano. Esta característica facilita su extrusión a temperaturas inferiores, pero también incrementa el riesgo de colapsos estructurales si no se controla adecuadamente la solidificación postimpresión.

La temperatura de extrusión se estableció en 26 °C como valor óptimo, tras descartar temperaturas más bajas que provocaban obstrucciones. Este ajuste permitió obtener una impresión fluida, estable y con excelente definición geométrica. Asimismo, se mantuvo una velocidad de impresión de 720 mm/min, conservando la consistencia metodológica con los ensayos previos.

En el ensayo de impresión multicapa, se confirmó la viabilidad técnica de combinar chocolate negro y blanco en una misma pieza, siempre que se respeten sus parámetros térmicos individuales y se controle el tiempo de solidificación entre capas.

Asimismo, el uso de nitrógeno líquido como técnica de enfriamiento rápido resultó eficaz para preservar la geometría y mejorar la adhesión entre capas, aunque se identificó la necesidad de protocolizar su aplicación para evitar microfisuras por choque térmico.

En conjunto, estos resultados subrayan la importancia de comprender la relación entre composición, comportamiento reológico y control térmico en la impresión 3D de chocolates. El chocolate blanco, pese a su mayor fluidez, puede ser impreso con precisión siempre que se adopten medidas específicas de ajuste térmico y estructural.

Por todo ello, los parámetros de impresión identificados como más adecuados se resumen a continuación:

Categoría	Parámetro	Valor
Extrusor	Diámetro de la boquilla	1,00 mm
	Ancho de extrusión	1,00 mm
	Velocidad de retracción	300 mm/min
	Distancia de retracción	1,00 mm
Temperatura	Temperatura del extrusor	26 °C
	Temperatura de la cama	18 °C (refrigerada)
Capa	Altura de capa	2,00 mm
Velocidades	Velocidad de impresión	720 mm/min (11,3 mm/s)
Relleno	Porcentaje de relleno interno	80 %
	Patrón de relleno interno	Triangular
Soportes	Porcentaje de relleno soporte	75 %

Tabla 7. Parámetros de Impresión 3D óptimos para Chocolate Blanco.

Para consultar el resto de parámetros técnicos asociados a la impresora y al proceso de impresión, véase la sección A.2 del Anexo A.

4.3. Caracterización de la Zanahoria

Como parte del análisis de matrices vegetales aplicables a la impresión 3D de alimentos, se decidió empezado por la caracterización de la zanahoria debido a su disponibilidad, versatilidad tecnológica y valor nutricional. Este vegetal ha demostrado un comportamiento favorable tanto en la preparación como en la extrusión de mezclas alimentarias, lo que lo convierte en una excelente base para formulaciones impresas funcionales, estables y reproducibles.

La zanahoria es una hortaliza de raíz ampliamente utilizada en la industria alimentaria por su sabor, color y densidad nutricional. Es una fuente importante de fibra dietética, vitamina A (en forma de β -caroteno), vitamina K1, potasio y antioxidantes naturales [80]. En particular, su elevada concentración de carotenoides —responsables de su pigmentación anaranjada— le confiere propiedades beneficiosas asociadas a la protección frente al estrés oxidativo, el envejecimiento celular y enfermedades cardiovasculares [81]. Además, su perfil sensorial suave y ligeramente dulce facilita su incorporación en una amplia variedad de productos alimenticios.

Desde el punto de vista funcional, la zanahoria procesada en forma de puré o pasta presenta un comportamiento reológico pseudoplástico, caracterizado por una viscosidad elevada en reposo que disminuye con el aumento del esfuerzo de corte. Esta propiedad, compartida con otros vegetales como el brócoli o la lombarda, permite una extrusión fluida durante el proceso de impresión 3D, al tiempo que favorece la retención de la forma una vez depositado el filamento [82]. La aplicación de agentes estructurantes como fécula, agar o goma xantana contribuye a ajustar el perfil reológico de la mezcla, incrementando la estabilidad y la cohesión entre capas.

Además de sus ventajas técnicas, la zanahoria representa una opción sostenible desde la perspectiva de aprovechamiento de excedentes agrícolas. Su uso en forma deshidratada

permite revalorizar productos fuera de calibre y reducir pérdidas postcosecha, integrándola en formulaciones alimentarias de alto valor añadido. Esta estrategia se alinea con los objetivos de economía circular y desarrollo de productos personalizados más sostenibles.

Por su equilibrio entre funcionalidad, valor nutricional y adaptabilidad tecnológica, la zanahoria constituye una matriz vegetal de referencia para el desarrollo de alimentos impresos mediante tecnologías aditivas.

4.3.1. Evaluación del Comportamiento de la Zanahoria Cocida durante la Impresión

En primera instancia se empleó puré de zanahoria cocida, apreciado por su sabor neutro y su riqueza en carotenoides, que actúan como antioxidantes y provitamina A, mejorando el valor nutricional de la tinta alimentaria [83].

La zanahoria cocida presenta un contenido de agua cercano al 90 % y un bajo contenido de almidón nativo, lo que deriva en una baja viscosidad, sinéresis y limitada retención de forma, afectando la precisión y cohesión de las piezas impresas [82]. Para contrarrestar estas deficiencias y lograr una textura adecuada, se optó por incorporar tres agentes funcionales:

- El almidón de patata, con un contenido de 21–27 % de amilosa y 73–79 % de amilopectina, actúa como espesante natural, incrementando la viscosidad del puré y favoreciendo la formación de redes cohesivas que mejoran la estabilidad dimensional tras la impresión [84].
- La goma xantana, polisacárido de alto peso molecular, exhibe un comportamiento pseudoplástico —es decir, su viscosidad disminuye al aumentar la velocidad de corte—, lo que optimiza la extrusión y refuerza la cohesión interna del gel impreso [85].
- Finalmente, la adición de aceite de oliva incrementa la extracción y micelarización de carotenoides del puré cocido, mejora la lubricidad del flujo durante la extrusión y reduce la evaporación superficial en el secado, preservando la forma y otorgando una textura más suave al producto final.

Estos ensayos permitieron identificar los principales desafíos asociados al uso del puré de zanahoria como material de impresión, tales como la inestabilidad dimensional derivada de la sinéresis, la limitada cohesión estructural y la escasa fidelidad de las formas complejas [82], [86]. Asimismo, se pusieron de manifiesto estrategias de mejora, entre las que destacan el ajuste de la composición reológica mediante la selección y dosificación de agentes estabilizantes, la optimización de parámetros de impresión (velocidad, presión, temperatura) y el diseño de pretratamientos de la materia prima para modular su perfil funcional, orientadas a ampliar las aplicaciones futuras de este biomaterial alimentario [13].

4.3.1.1. Ensayo 1: Calibración Estructural y Geométrica de la Mezcla de Zanahoria Cocida

4.3.1.1.1. Justificación de Diseño Experimental

Para evaluar la aptitud de un puré de zanahoria cocida en impresión 3D, se llevó a cabo un ensayo preliminar orientado a calibrar su capacidad de extrusión y la fidelidad geométrica de la matriz depositada. Para ello, se utilizó el Modelo B. 5.

La formulación de partida se desarrolló siguiendo la metodología descrita por Pant et al. [49], y se ve reflejada a continuación en la Tabla 8.

Material	Cantidad (g)
Zanahoria	210
Agua	210
Almidón de patata (20%)	106,06
Goma Xantana (0,8%)	4,24

Tabla 8. Mezcla de Puré de Zanahoria para el Ensayo 1 de Zanahoria Cocida.

La zanahoria fresca contiene aproximadamente un 90 % p/p de humedad. Dado su bajo contenido nativo de almidón en base seca (8–15 mg/g), se añadió almidón de patata al 20 % p/p para potenciar la formación de redes de gel, aprovechando el hinchamiento y gelatinización de los gránulos para incrementar la viscosidad en reposo y la resistencia mecánica de la pieza impresa [87], [49]. La incorporación de goma xantana al 0,8 % p/p confiere un comportamiento pseudoplástico —elevada viscosidad estática y rápida recuperación tras la boquilla—, esencial para minimizar la sinéresis y asegurar la cohesión intercapas [49].

Finalmente, el agua (50 % p/p sobre la masa de zanahoria) ajusta el nivel de humedad, equilibrando la extrudabilidad y la definición dimensional requerida, tal como se estipula en [49].

4.3.1.1.2. Análisis de Resultados

La Mezcla 1 presentó una viscosidad excesiva que impidió un flujo continuo bajo presión constante, lo que generó interrupciones en el extrusado y falta de adherencia intercapas, como puede apreciarse en la Figura 24.



Figura 24. Resultados del Ensayo 1 de Zanahoria Cocida.

Este comportamiento confirma que una densidad de red almidón–xantana tan elevada supera el umbral funcional de boquillas de 0,84 mm de diámetro [88].

Cabe destacar que, tras 24 h de reposo, la pieza impresa no conservó su geometría básica, mostrando fisuras y retracción del gel de almidón debido a la pérdida de humedad, lo que pone de manifiesto la necesidad de evaluar la estabilidad posimpresión en matrices vegetales con alto contenido sólido [88].



Figura 25. Resultados Ensayo 1 con Mezcla 1 tras 24h de Reposo.

Para superar estas limitaciones, se propuso aumentar la proporción de agua a fin de reducir la carga efectiva de almidón y explorar la incorporación de humectantes o agentes

anti-sinéresis, como la glicerina, estrategia frecuente en sistemas vegetales para controlar la pérdida de agua sin sacrificar la definición estructural [35].

En definitiva, estos resultados evidencian que el punto óptimo de viscosidad en emulsiones de puré vegetal debe calibrarse con precisión: niveles demasiado bajos comprometen la retención de forma, mientras que excesos dificultan la extrusión y acentúan la sinéresis posimpresión.

4.3.1.2. Ensayo 2: Ajuste de Fluidez de la Mezcla de Zanahoria Cocida

4.3.1.2.1. Justificación de Diseño Experimental

A partir de las observaciones del ensayo anterior, se formuló una nueva mezcla con una proporción mayor de agua, con el objetivo de mejorar la fluidez del material y facilitar la extrusión a través de la boquilla.

Material	Cantidad (g)
Zanahoria	192
Agua	191
Almidón de patata (20%)	90,15
Goma Xantana (0,8%)	3,61
Se añadieron 65 g de agua a la mezcla final.	

Tabla 9. Mezcla de Puré de Zanahoria para el Ensayo 2 de Zanahoria Cocida.

Esta estrategia responde a estudios que muestran cómo la dilución controlada de pastas alimentarias mejora la extrudabilidad sin sacrificar completamente la cohesión interna [89], [49]. Además, la elección de niveles moderados de agentes gelificantes obedece a la necesidad de mantener un *yield stress* suficiente para la retención de forma, pero menor que el umbral de bloqueo característico de boquillas ≤ 1 mm [13].

Para evaluar de forma integral la nueva formulación, se diseñaron dos subensayos:

- El primer subensayo consistió en la impresión de un contorno hexagonal plano con el fin de evaluar la precisión geométrica y la uniformidad del filamento depositado, utilizando el Modelo B. 6. Al trazar un polígono regular de seis lados, se midieron la fidelidad de los ángulos, la consistencia del ancho de línea y la adherencia entre capas en un entorno bidimensional. Se esperaba que la nueva mezcla mantuviera bordes nítidos y un espesor de pared constante, sin presentar ensanchamiento o discontinuidades, indicadores clave de un flujo de material adecuado y una recuperación elástica suficiente tras el paso por la boquilla.
- En el segundo subensayo implicó la construcción de un modelo tridimensional con forma de barco, diseñado para someter a la mezcla a cargas autoimpuestas y evaluar su capacidad de autosoporte (Modelo B. 7). Al imprimir volúmenes crecientes en altura, se observó el comportamiento frente al colapso de voladizos, el fenómeno de goteo entre capas superiores e inferiores y la resistencia mecánica del gel fresco durante el proceso.

4.3.1.2.2. Análisis de Resultados

En el primer subensayo, la mezcla logró una deposición más uniforme y continua, confirmando la eficacia del aumento de agua para reducir la viscosidad en reposo.



Figura 26. Resultados del Ensayo 2.1.

No obstante, la definición geométrica de los detalles punteados resultó insuficiente, presentándose bordes redondeados que apuntan a una leve sobreextrusión o a una capacidad limitada del gel para fijar trazos finos tras la deposición. Tras 24 h de reposo, la pieza exhibió una contracción superficial leve y un endurecimiento externo por evaporación parcial, mientras que su núcleo permaneció semiflexible, lo que sugiere la necesidad de tiempos de secado o condiciones posimpresión más controlados.

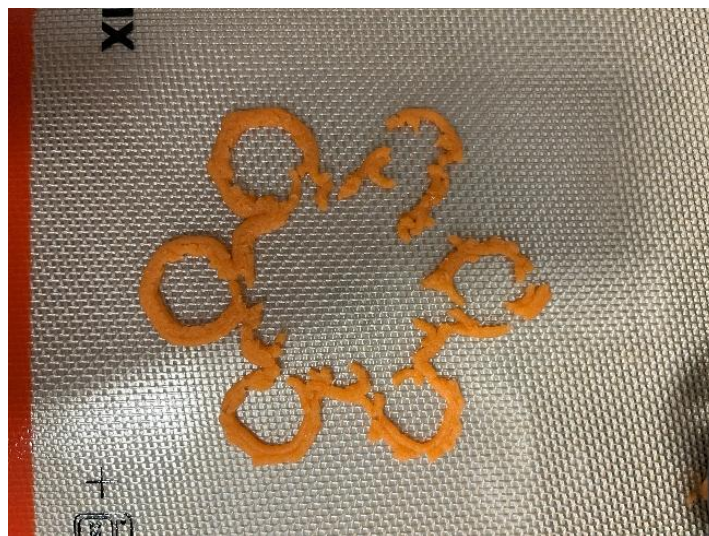


Figura 27. Resultados del Ensayo 2.1 tras 24h de Reposo.

Para profundizar en la resistencia estructural, se llevó a cabo el segundo subensayo, consistente en la impresión de un modelo vertical complejo, utilizando el modelo Modelo B. 7.

Durante el proceso, la estructura colapsó antes de finalizarse, atribuyéndose este fallo a la insuficiente rigidez mecánica del gel fresco y a la ausencia de soporte o enfriamiento activo que estabilizara las capas iniciales.



Figura 28. Comienzo de Impresión del Ensayo 2.2.



Figura 29. Resultados del Ensayo 2.2.

A las 24 h de reposo, solo la superficie mostró un ligero fraguado, mientras que el interior seguía blando, lo que reafirma la limitación de la formulación para soportar cargas propias.



Figura 30. Resultado final del Ensayo 2.2 tras 24h de reposo.

4.3.1.3. Conclusiones de los Ensayos con Zanahoria Cocida en Impresión 3D

Los ensayos realizados con puré de zanahoria cocida evidencian que, aunque un incremento en la fluidez del material favorece la extrusión continua, este factor compromete seriamente la estabilidad geométrica en impresiones con voladizos o estructuras con carga autoimpuesta. En particular, se observaron deformaciones, colapsos parciales y una pobre definición de bordes, especialmente tras el proceso de enfriamiento.

Los parámetros de extrusión óptimos identificados en este ensayo se resumen en la siguiente tabla:

Categoría	Parámetro	Valor
Extrusor	Diámetro de la boquilla	1,00 mm
	Ancho de extrusión	1,00 mm
	Velocidad de retracción	300 mm/min
	Distancia de retracción	1,00 mm
Temperatura	Temperatura del extrusor	35 °C
Capa	Altura de capa	1,50 mm
Velocidades	Velocidad de impresión	540 mm/min (9 mm/s)
Relleno	Porcentaje de relleno interno	30 %
	Patrón de relleno interno	Triangular
Soportes	Porcentaje de relleno soporte	30 %
	Patrón de relleno soporte	Alineado

Tabla 10. Mezcla de Puré de Zanahoria para el Ensayo 2 de Zanahoria Cocida.

A pesar de la calibración cuidadosa de estos parámetros, la calidad de impresión obtenida fue limitada, especialmente en términos de resolución y cohesión estructural postimpresión. Estas limitaciones sugieren que la formulación basada únicamente en puré

de zanahoria cocida no ofrece un perfil reológico suficientemente robusto para aplicaciones de impresión 3D que requieran alta precisión y autosoporte.

Por lo tanto, se propone avanzar hacia una formulación basada en zanahoria en polvo tamizada con hidratación controlada como siguiente estrategia de optimización. La reducción del tamaño de partícula mediante tamizado favorece una distribución más homogénea en la fase sólida, lo que estabiliza el perfil de flujo y mejora la fidelidad geométrica durante la extrusión [89].

Por otro lado, el control preciso de la hidratación —es decir, la dosificación exacta de agua para alcanzar el contenido de humedad óptimo— permite ajustar tanto la viscosidad inicial como el *yield stress* del material, reduciendo la variabilidad entre lotes y facilitando la retención de detalles finos tras el paso por la boquilla [82].

En conjunto, la adopción de zanahoria en polvo tamizada con hidratación controlada promete un equilibrio más robusto entre fluidez, cohesión interna y capacidad de autosoporte, optimizando el rendimiento de impresiones 3D con mezclas vegetales.

Para consultar el resto de parámetros técnicos asociados al proceso de impresión con zanahoria cocida, véase la sección A.3 del Anexo A.

4.3.2. Evaluación del Uso de la Zanahoria Deshidratada durante la Impresión

El empleo de zanahoria deshidratada en polvo como materia prima para impresión 3D responde a una combinación de exigencias funcionales, operativas y sostenibles que no siempre pueden satisfacerse con ingredientes frescos.

En primer lugar, la transformación de la zanahoria en polvo permite estandarizar el contenido de humedad inicial, lo cual resulta esencial para garantizar la reproducibilidad de las mezclas formuladas. A diferencia del puré vegetal, cuya humedad puede variar significativamente entre lotes y afectar el comportamiento reológico, el polvo seco proporciona una base constante desde la cual es posible ajustar con precisión tanto la proporción de agua como la concentración de aditivos funcionales. Esta estandarización facilita el control de parámetros clave como la viscosidad o el esfuerzo de cedencia (*yield stress*), que determinan la calidad del flujo durante la extrusión y la capacidad del material para mantener su forma tras la deposición [82].

En segundo lugar, el uso del polvo permite modular la reología de la mezcla mediante la incorporación homogénea de agentes estructurantes como gomas, almidones o proteínas, optimizando la consistencia, la adhesión interlaminar y la estabilidad de las capas impresas. El control sobre el tamaño de partícula, obtenido mediante molienda y tamizado tras el secado, mejora significativamente la uniformidad del flujo en el cabezal de extrusión, minimiza obstrucciones y favorece una deposición precisa y estable. Esto permite fabricar piezas con mayor fidelidad geométrica, reproducibilidad y calidad estructural, especialmente en diseños que requieren un alto grado de detalle o volumen vertical.

Asimismo, el producto deshidratado ofrece mayor estabilidad en el almacenamiento, facilitando su conservación a largo plazo sin necesidad de refrigeración ni procesamiento inmediato. Esta característica resulta especialmente ventajosa tanto en entornos

industriales, donde se requiere un suministro constante de materia prima homogénea, como en laboratorios que demandan reproducibilidad entre experimentos.

Por último, la utilización de vegetales deshidratados como materia prima representa una estrategia alineada con los principios de sostenibilidad y economía circular. La deshidratación térmica permite valorizar excedentes agrícolas y productos fuera de calibre, transformándolos en ingredientes estables, nutritivos y técnicamente funcionales [81]. Este enfoque reduce el desperdicio alimentario y contribuye a disminuir la huella ambiental asociada a la cadena de producción y distribución de alimentos frescos.

En este contexto, la impresión 3D basada en polvos vegetales ofrece un modelo flexible y eficiente para incorporar subproductos del sector agroalimentario en nuevas aplicaciones tecnológicas, facilitando la transición hacia sistemas alimentarios más sostenibles, resilientes y adaptados a las necesidades nutricionales del futuro [31].

4.3.2.1. Deshidratación de la Zanahoria

Para la obtención de zanahoria en polvo destinada a impresión 3D, se procesaron 1 kg de zanahorias frescas utilizando una deshidratadora doméstica WMF Kitchenminis Snack to Go, la cual emplea circulación de aire caliente a temperatura controlada. Este método de deshidratación convectiva permite reducir el contenido de humedad de forma progresiva, favoreciendo la conservación del alimento y la concentración de compuestos funcionales como los carotenoides [90].

Inicialmente, las zanahorias se lavaron, pelaron y cortaron en rodajas de aproximadamente 3–5 mm de grosor. Las rodajas se distribuyeron de manera uniforme sobre las bandejas de secado, evitando el solapamiento, y se introdujeron en la deshidratadora. El proceso se llevó a cabo a una temperatura constante de 55 °C durante 10 horas, condiciones que han demostrado ser eficaces para preservar la integridad estructural y reducir la pérdida de compuestos bioactivos en vegetales de raíz.



Figura 31. Deshidratadora doméstica WMF Kitchenminis Snack to Go.

Una vez finalizado el secado, las rodajas deshidratadas presentaban una textura firme y crujiente, con una humedad residual inferior al 10 %, lo cual es adecuado para su posterior pulverización. El producto seco se trituró utilizando un molino de cuchillas, obteniéndose un polvo fino. Este se tamizó mediante tamiz de malla estándar para homogeneizar el tamaño de partícula, un paso fundamental para mejorar la extrudabilidad y garantizar un flujo continuo y estable durante el proceso de impresión 3D.



Figura 32. Proceso de deshidratación de zanahoria: bandejas con rodajas frescas antes del secado (izquierda) y zanahoria deshidratada tras el proceso térmico (derecha).



Figura 33. Pulverización de la zanahoria deshidratada en molino de cuchillas (izquierda) y polvo resultante tamizado y almacenado herméticamente (derecha).

Este protocolo, basado en metodologías estándar de deshidratación térmica de vegetales, permite obtener un ingrediente en polvo con propiedades reológicas adecuadas para ser reconstituido y empleado como matriz alimentaria en impresión 3D. La reducción del tamaño de partícula y la baja humedad final contribuyen a mejorar la fidelidad geométrica, la estabilidad dimensional del filamento extruido y la conservación de la mezcla.

Esta evaluación técnica sustenta la elección del polvo de zanahoria como sustrato clave en el desarrollo experimental, por su combinación de funcionalidad reológica, estabilidad logística y valor nutricional.

4.3.2.2. *Ensayo: Influencia del Agar-Agar como Gelificante Térmico en la Extrusabilidad de Mezclas de Zanahoria Deshidratada para Impresión 3D*

4.3.2.2.1. Justificación de Diseño Experimental

Para mejorar la extrusión de pastas de zanahoria deshidratada en impresión 3D, se seleccionó el agar-agar como gelificante térmico debido a su capacidad para generar redes tridimensionales al enfriarse, lo que incrementa el *yield stress* y la estabilidad del cordón depositado.

Estudios previos han demostrado que, en concentraciones cercanas al 1 % p/p, el agar-agar confiere al material una resistencia mecánica suficiente para retener forma sin elevar en exceso la viscosidad de reposo, manteniendo así una extrusabilidad óptima [48]. Sobre esta base, se diseñó una mezcla conformada por los ingredientes reflejados a continuación en la Tabla 11.

Ingredientes	Cantidad (g)
Polvo de zanahoria deshidratada	12,5
Agar-agar (1.6% p/p)	1
Agua caliente	49

Tabla 11. Mezcla para el Ensayo de Zanahoria Deshidratada.

La hidratación inicial del polvo se llevó a cabo con 43,75 mL de agua a 80 °C, seguido de la disolución del agar-agar en 5,25 mL de agua hirviendo, asegurando una red gelificada homogénea. Durante la impresión, la mezcla se mantuvo a 50 °C para evitar la gelación prematura en la boquilla y favorecer un flujo continuo [13].

4.3.2.2.2. Análisis de Resultados

En un primer ensayo fallido, la extrusión presentó problemas de homogeneidad, manifestados en la formación de grumos y cordones interrumpidos debido a la falta de tamizado y a una velocidad de deposición excesiva.

Sin embargo, tras introducir los ajustes pertinentes en el ensayo definitivo —reducción de la velocidad de impresión para favorecer un flujo más controlado, eliminación de geometrías con aristas agudas que pudieran generar concentraciones de tensiones y

tamizado del polvo de zanahoria a 200 μm antes de la hidratación— la mezcla adoptó un comportamiento claramente pseudoplástico. Es decir, presentó una viscosidad inicial suficientemente elevada que permitió mantener la forma y estabilidad tras la deposición del cordón, seguida de una progresiva reducción de la viscosidad aparente conforme se incrementaba la velocidad de cizalla. Este efecto facilitó la extrusión continua y la formación de un filamento homogéneo, sin interrupciones ni deformaciones, comportamiento coherente con el observado en los ensayos previos realizados con matrices como el chocolate, donde la estructura interna del material responde de forma similar al someterse a esfuerzos controlados.



Figura 34. Resultados del Ensayo 3.2.

Estos resultados ponen de manifiesto que la estandarización del tamaño de partícula y el diseño cuidadoso del protocolo de impresión son determinantes para optimizar tanto la extrudabilidad como la fidelidad geométrica en la elaboración de mezclas vegetales para impresión 3D.

4.3.2.3. Conclusiones Finales Sobre el Uso de la Zanahoria Deshidratada en Impresión

Los ensayos con zanahoria deshidratada reconstituída han demostrado que esta matriz vegetal constituye una alternativa altamente prometedora frente al uso de vegetales frescos o cocidos, al ofrecer un mejor control sobre la reología, la extrusabilidad y la estabilidad postimpresión. La estandarización del contenido de humedad, la homogeneización del tamaño de partícula mediante tamizado, y la incorporación de gelificantes como el agar-agar, permitieron obtener una mezcla con comportamiento controlado, adecuada para geometrías complejas y capaz de mantener su forma tras la deposición.

Los resultados mostraron que, con un diseño de formulación preciso y parámetros de impresión bien ajustados, es posible inducir un comportamiento de tipo plástico con yield stress, característico de materiales similares a un fluido de Bingham. Este comportamiento es fundamental para lograr una deposición limpia, sin colapsos ni deformaciones, incluso en condiciones de enfriamiento progresivo.

En particular, la incorporación de agar-agar en proporciones del 1,6 % p/p y la aplicación de un control térmico adecuado durante la impresión (50 °C en el extrusor) permitieron estabilizar la mezcla y mejorar tanto la continuidad del filamento como la fidelidad geométrica. Además, la reducción de la velocidad de impresión a 300 mm/min resultó decisiva para asegurar un flujo constante sin obstrucciones ni interrupciones.

En resumen, la zanahoria deshidratada con hidratación controlada y gelificación térmica representa una solución eficiente y técnicamente viable para impresión 3D de alimentos a base de vegetales, combinando ventajas funcionales, nutricionales y logísticas.

Por todo ello, los parámetros de impresión identificados como más adecuados se resumen a continuación:

Categoría	Parámetro	Valor
Extrusor	Diámetro de la boquilla	1,50 mm
	Ancho de extrusión	1,50 mm
	Velocidad de retracción	300 mm/min
	Distancia de retracción	3,00 mm
Temperatura	Temperatura del extrusor	50 °C
Capa	Altura de capa	2,00 mm
Velocidades	Velocidad de impresión	300 mm/min (5 mm/s)
Relleno	Porcentaje de relleno interno	30 %
	Patrón de relleno interno	Triangular
Soportes	Porcentaje de relleno soporte	30 %
	Patrón de relleno soporte	Alineado

Tabla 12. Parámetros de Impresión 3D óptimos para Zanahoria Deshidratada.

Para consultar el resto de parámetros técnicos asociados al proceso de impresión con zanahoria deshidratada, véase la sección A.4 del Anexo A.

4.4. Caracterización del Brócoli

En la línea de exploración de matrices vegetales para impresión 3D, se seleccionó el brócoli por su amplia presencia en procesos de transformación industrial (como purés, extrusiones o ingredientes funcionales), así como por su perfil nutricional excepcionalmente denso. Este vegetal contiene fibra dietética, vitaminas (C, K), minerales y elevados niveles de compuestos bioactivos como glucosinolatos y sulforafano, asociados a efectos antioxidantes, antiinflamatorios y potenciales beneficios preventivos frente a enfermedades crónicas [41], [91].

El brócoli también es reconocido por su versatilidad industrial; los subproductos (hojas, tallos) pueden revalorizarse como ingredientes funcionales, minimizando el desperdicio agroindustrial [31], [92].

Su disponibilidad y costo lo hacen especialmente atractivo como fuente de materia prima para alimentos impresos, alineándose con modelos circulares y de sostenibilidad.

En línea con el enfoque adoptado en los apartados anteriores, se ha continuado la exploración de matrices vegetales como base para la impresión 3D de alimentos. Tras los resultados positivos obtenidos con la zanahoria, se seleccionó el brócoli como siguiente ingrediente de estudio, tanto por su perfil nutricional altamente valorado como por sus propiedades funcionales adecuadas para procesos de extrusión controlada. Esta elección responde al interés por incorporar vegetales con alto valor añadido que permitan desarrollar formulaciones impresas saludables, sostenibles y técnicamente viables.

El brócoli es una hortaliza crucífera ampliamente reconocida por su denso perfil nutricional. Destaca por su contenido en fibra dietética, vitaminas C y K, minerales como calcio y potasio, y una elevada concentración de compuestos bioactivos como glucosinolatos y sulforafano. Estos últimos han sido ampliamente estudiados por su potencial efecto antioxidante, antiinflamatorio y protector frente a diversas enfermedades crónicas, incluyendo ciertos tipos de cáncer [41], [91].

Además, el brócoli genera subproductos agroindustriales —como hojas y tallos— que pueden ser revalorizados como ingredientes funcionales en tecnologías emergentes, promoviendo un enfoque alineado con los principios de economía circular y reducción del desperdicio alimentario [31], [92].

Desde una perspectiva de ingeniería alimentaria, el brócoli ofrece propiedades reológicas compatibles con los requisitos de impresión 3D. En estado pastoso, presenta un comportamiento pseudoplástico, caracterizado por una alta viscosidad en reposo que disminuye bajo esfuerzo de corte. Esta propiedad resulta esencial para garantizar la extrudabilidad del material, así como la conservación de la forma tras la deposición capa a capa. Estudios recientes han confirmado que, tras su deshidratación y reconstitución adecuada, el brócoli mantiene este perfil reológico y puede ser formulado con hidrocoloides para mejorar la estabilidad y cohesión estructural durante la impresión [41].

Gracias a esta combinación de beneficios funcionales, nutricionales y tecnológicos, el brócoli representa una materia prima muy prometedora para su incorporación en formulaciones impresas, especialmente en el desarrollo de productos saludables y personalizables adaptados a necesidades dietéticas específicas.

4.4.1. Evaluación del Uso del Brócoli Deshidratado durante la Impresión

El brócoli en polvo deshidratado emerge como una estrategia eficaz para reproducir y mejorar los resultados obtenidos con la zanahoria, gracias a varias ventajas clave combinadas.

En primer lugar, la deshidratación por aire caliente estabiliza el contenido de humedad y permite obtener partículas de tamaño controlado, esenciales para la consistencia reológica durante la extrusión y para asegurar la fidelidad estructural de las piezas impresas. Esta forma de procesamiento conserva los compuestos bioactivos del brócoli, incluidos

glucosinolatos y sulforafano [93]. Desde el punto de vista nutricional y funcional, el brócoli representa una de las verduras más interesantes para su uso en impresión alimentaria. Su alto contenido en fibra, vitaminas (C, K), minerales y fitoquímicos lo convierte en una matriz vegetal con valor añadido, que puede contribuir tanto a la salud del consumidor como a la diferenciación de productos en aplicaciones dietéticas o personalizadas [94].

La reología de la mezcla se optimiza mediante la molienda y tamizado tras el secado, obteniendo partículas que se dispersan eficazmente en hidrogeles formulados con fécula de patata, agar-agar, goma xantana y aceite de oliva. Cada aditivo cumple un papel funcional: la fécula incrementa la viscosidad en reposo, el agar confiere estructura termoestable y yield stress, la xantana aporta comportamiento pseudoplástico, y el aceite mejora la lubricidad y propiedades organolépticas. Varios estudios han demostrado que la incorporación de hidrocoloides en matrices que contienen polvo de brócoli mejora significativamente la extrudabilidad y el comportamiento pseudoplástico, permitiendo flujos estables y una adhesión capa a capa óptima [41].

Estudios recientes que combinan alimentos vegetales deshidratados —incluido brócoli y zanahoria— en sistemas de impresión 3D han demostrado una fidelidad elevada, buena cohesión intercapas y una adecuada retención del valor nutricional del polvo original, reforzando la viabilidad de esta estrategia integrada para la creación de alimentos impresos funcionales y sostenibles [31].

4.4.1.1. Deshidratación del Brócoli

La obtención del polvo de brócoli sigue el mismo protocolo de deshidratación por aire caliente usado para la zanahoria en el apartado 4.3.2.1, con rodajas de 3–5 mm secadas en deshidratadora a 55 °C durante 10 horas. Tras este proceso, el polvo se tritura y tamiza en malla de 200 µm para garantizar un tamaño de partícula uniforme y un flujo óptimo durante la impresión.

Este procedimiento permite conservar los compuestos funcionales del brócoli de manera más eficaz que métodos de secado convencionales. El polvo final se conserva en envases herméticos, protegidos de la humedad y luz, hasta su uso posterior.

4.4.1.2. Ensayo 1: Evaluación Inicial de una Mezcla de Brócoli Deshidratado

Enriquecida con Aceite de Oliva

4.4.1.2.1. Justificación de Diseño Experimental

El objetivo principal de este primer ensayo fue evaluar la viabilidad técnica de una mezcla basada en brócoli deshidratado como tinta para impresión 3D, priorizando la fluidez de extrusión, la cohesión estructural y la retención de forma tras la deposición, para lo cual se utilizó el Modelo B. 4., con la mitad de altura que el modelo original. Siguiendo la lógica ya establecida en los ensayos con zanahoria, se formuló una mezcla equilibrada incorporando agentes espesantes y gelificantes, pero introduciendo como elemento diferenciador el aceite de oliva, por su potencial efecto plastificante y lubricante (véase Tabla 13).

Ingrediente	Cantidad	Función técnica principal
Polvo de brócoli deshidratado	30 g	Base vegetal de la mezcla; aporta estructura y sabor
Agua tibia o caldo vegetal	50 ml	Rehidratación del brócoli en polvo
Fécula de patata	4 g	Espesante; mejora la viscosidad en reposo
Agar-agar	2 g	Gelificante; estabiliza la forma tras la impresión
Goma xantana (opcional)	2 g	Modificador reológico; aporta comportamiento pseudoplástico
Aceite de oliva	5 ml	Lubricante y plastificante natural; mejora la extrusión y cohesión

Tabla 13. Formulación de la Mezcla del Ensayo 1 con Brócoli Deshidratado.

El diseño experimental de este primer ensayo se fundamentó en sólidas evidencias académicas que vinculan la composición de la mezcla con su comportamiento durante la impresión. La proporción de polvo de brócoli (30 g) en combinación con una hidratación controlada (50 ml de agua o caldo) replica la estrategia efectuada en la zanahoria deshidratada, cuya formulación demostró que un contenido sólido en torno al 30 % favorece el comportamiento pseudoplástico y la estabilidad geométrica de la impresión. La inclusión de agentes gelificantes como la fécula de patata (4 g) y el agar-agar (2 g) está respaldada por trabajos que señalan cómo estas sustancias incrementan la viscosidad en reposo y la rigidez de la estructura impresa, mejorando la capacidad de autosoporte en estructuras verticales [41], [95].

La goma xantana se incluyó de forma opcional siguiendo recomendaciones de Kim et al., quienes demostraron que este polisacárido inhibe la hinchazón de partículas vegetales, estabiliza el flujo y facilita la extrusión incluso con hasta 30 % de polvo de brócoli, manteniendo una alta resolución impresa [41].

Finalmente, el aceite de oliva fue incorporado tras evidencias recientes sobre su efecto lubricante y plastificante en mezclas viscoelásticas impresas. Un estudio con surimi 3D mostró que concentraciones del 4 % de oliva optimizan la fluidez, reducen fricción interna y mejoran la estabilidad dimensional [96]. En el contexto de masas vegetales, la adición de aceite también se ha demostrado esencial para mejorar la viscosidad, reducir pérdida por evaporación y facilitar la deposición por boquilla [95].

Este diseño, por tanto, está influenciado por una amplia base literaria que cubre desde el comportamiento reológico pseudoplástico, la funcionalidad de hidrocoloides y aceites vegetales, hasta parámetros de impresión válidos para vegetales en polvo.

El procedimiento utilizado para elaborar la mezcla puede verse en la Tabla 14.

Paso	Descripción
1	Rehidratar el polvo de brócoli con el agua tibia y dejar reposar durante 10 minutos.
2	Agregar la fécula de patata y mezclar bien hasta obtener una masa sin grumos.
3	Disolver el agar-agar: hervirlo con 20 ml de agua durante 2 minutos antes de añadirlo.
4	Incorporar la goma xantana (si se utiliza) y el aceite de oliva, mezclando hasta homogeneizar.
5	Dejar reposar la mezcla durante 15 minutos para favorecer la interacción entre componentes.
6	Imprimir la mezcla y secar la pieza al aire o en horno a 50–60 °C durante 1 hora.

Tabla 14. Procedimiento de Preparación de la Mezcla del Ensayo 1 con Brócoli Deshidratado.

4.4.1.2.2. Análisis de Resultados

La mezcla diseñada mostró durante el proceso de impresión un comportamiento reológico característico de un fluido pseudoplástico, es decir, una estructura que permanece estable y no fluye bajo su propio peso en reposo, pero que experimenta una reducción progresiva de la viscosidad aparente al aplicarse una fuerza de extrusión suficiente. Este comportamiento permite un equilibrio óptimo entre la estabilidad estructural postdeposición y la fluidez controlada durante el proceso de impresión, lo que resulta fundamental para obtener cordones definidos y geometrías reproducibles. Este patrón es ampliamente documentado en sistemas gelificados y en formulaciones vegetales diseñadas para impresión 3D, donde se busca precisamente ese compromiso entre resistencia en reposo y facilidad de extrusión bajo esfuerzo [41].

Durante el proceso, la mezcla fluyó de forma continua a través de la boquilla, sin interrupciones ni bloqueos, lo que confirma que las proporciones de agua, sólidos y agentes estructurantes eran adecuadas (véase Figura 35).

El aceite de oliva tuvo un papel clave en este rendimiento favorable. Su incorporación en proporciones moderadas facilitó la extrusión al reducir la fricción interna de la mezcla y actuar como plastificante natural. Además, limitó la evaporación superficial durante la impresión, lo que favoreció una buena cohesión interlaminar. Este efecto ha sido documentado en estudios recientes, donde la inclusión de aceites comestibles (como oliva o canola) en matrices proteicas o vegetales aumentó la estabilidad geométrica y la fluidez sin comprometer la forma impresa [95], [96].

Una vez depositada, la mezcla mantuvo su forma, conservando bordes definidos y una adecuada adhesión entre capas, sin colapsos ni expansión lateral excesiva. Estos resultados son consistentes con lo observado en formulaciones similares a base de vegetales deshidratados y gelificantes [41], [97].



Figura 35. Proceso de Impresión del Ensayo 1 con Brócoli Deshidratado.

Se realizó una comparativa entre dos configuraciones de altura de capa: se observó un impacto directo en la calidad estructural del producto final. Con una altura reducida, la boquilla generaba fricción constante sobre el material ya depositado, lo que provocó arrastre y deformaciones localizadas (Figura 36, izquierda). En cambio, con una altura ligeramente mayor (Figura 36, derecha), se evitó el contacto directo con el cordón impreso, lo que resultó en líneas más limpias, mejor adherencia entre capas y mayor fidelidad geométrica. Este fenómeno ha sido identificado en múltiples estudios como una variable crítica para la optimización del proceso, especialmente en mezclas con cierto grado de rigidez tras la extrusión [97].

En conjunto, los resultados validan la idoneidad del brócoli deshidratado como matriz vegetal en impresión 3D alimentaria, siempre que se acompañe de una formulación equilibrada que combine agentes gelificantes, líquidos adecuados y aditivos como aceites para ajustar el comportamiento reológico. El comportamiento observado, próximo al de un fluido plástico de Bingham, es clave para asegurar una impresión precisa y estable.



Figura 36. Resultados del Ensayo 1 con Brócoli Deshidratado.

4.4.1.3. Ensayo 2: Evaluación de la Estabilidad Vertical en Piezas de Cinco Capas

4.4.1.3.1. Justificación de Diseño Experimental

Para profundizar en la caracterización de la mezcla formulada, se diseñó un segundo ensayo centrado en evaluar su comportamiento en estructuras más elevadas. El objetivo fue determinar la viabilidad del material para construir piezas verticales de varias capas, cuando el principal desafío es evitar el colapso o el desplazamiento lateral.

Debido a que la mezcla demostró un comportamiento tipo fluido pseudoplástico en el primer ensayo —propiedad valiosa para mantener forma tras la deposición [41]—, se decidió imprimir una figura compuesta por cinco capas sucesivas utilizando el mismo procedimiento de preparación. Se utilizó el mismo modelo empleado en el Ensayo 1 (Modelo B. 4), pero en este caso se mantuvo su altura original, no se redujo.

La altura generada (cinco capas) representa un escenario intermedio entre muestras planas y estructuras críticas en impresión 3D, permitiendo evaluar si la tensión de fluencia y rigidez posdepósito son suficientes para soportar su propio peso.

4.4.1.3.2. Análisis de Resultados

Durante la impresión, la mezcla formulada permitió una extrusión continua, uniforme y estable, lo que posibilitó el apilamiento preciso de las cinco capas sin interrupciones ni defectos estructurales.



Figura 37. Proceso de Impresión del Ensayo 2 con Brócoli Deshidratado.

Asimismo, la figura final obtenida mostró una alta fidelidad geométrica respecto al diseño original, con bordes bien definidos, líneas regulares y una superficie sin colapsos ni desplazamientos, lo que indica una combinación adecuada de fluidez y estabilidad estructural durante el proceso.

Este resultado es coherente con los requisitos funcionales para la impresión vertical en 3D alimentario, donde es fundamental que el material mantenga su forma tras la deposición (véase Figura 38). En la literatura, se ha descrito que para lograr buena precisión geométrica en impresiones multicapa, el material debe presentar una tensión de fluencia suficientemente alta (*yield stress*), junto con una rápida recuperación estructural tras la extrusión. El comportamiento observado en esta mezcla —extrusión fluida pero forma sólida al detenerse— es representativo de materiales con comportamiento pseudoplástico, como ya se había señalado en el ensayo previo.

Tras 24 horas de reposo en condiciones ambientales, la figura conservó íntegramente su geometría original, sin evidencia de colapso, hundimiento o deformación. Esta estabilidad estructural postimpresión refleja una buena cohesión interna y una red gelificada suficientemente firme como para soportar el peso de la propia estructura. El equilibrio alcanzado entre los agentes gelificantes y la hidratación de la matriz permitió mantener una rigidez suficiente tras la deposición, lo que ha sido identificado en investigaciones recientes como una condición clave para impresiones en altura (véase Figura 39).

Desde el punto de vista reológico, los resultados confirman que la formulación posee un balance funcional entre fluidez bajo presión y rigidez tras el depósito, es decir, un

comportamiento reológico que favorece tanto la extrudabilidad como la autoestabilidad de las capas. Esto es esencial en impresión 3D de alimentos, especialmente cuando se busca escalar en complejidad geométrica sin depender de soportes externos ni tiempos extensos de posprocesado.

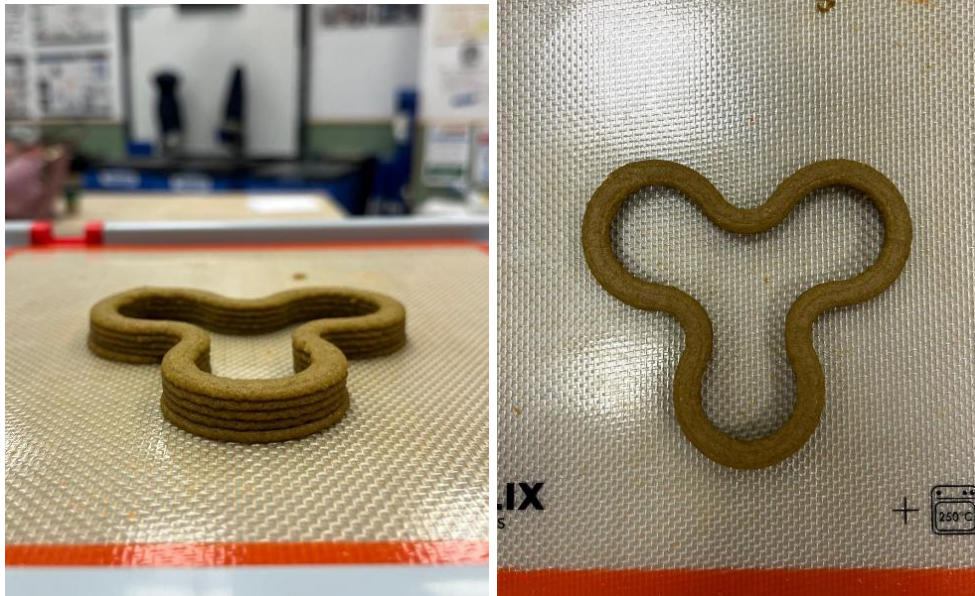


Figura 38. Resultados del Ensayo 2 con Brócoli Deshidratado.



Figura 39. Resultados del Ensayo 2 con Brócoli Deshidratado – 24h de Reposo.

En resumen, el ensayo 2 valida la capacidad de esta formulación para construir piezas tridimensionales con desarrollo vertical, manteniendo tanto la precisión geométrica inicial como la estabilidad estructural en el tiempo.

4.4.1.4. Conclusiones Finales Sobre el Uso del Brócoli Deshidratado en Impresión

Los ensayos realizados con brócoli deshidratado validan su idoneidad como matriz vegetal para impresión 3D alimentaria, destacando tanto por su valor nutricional como por sus propiedades funcionales. A través de un protocolo de deshidratación térmica, molienda y tamizado, se obtuvo un polvo vegetal con características reológicas adecuadas para mezclas gelificadas, permitiendo un control preciso del flujo y una deposición estable en condiciones controladas.

La incorporación de agentes como fécula de patata, agar-agar, goma xantana y aceite de oliva contribuyó de forma decisiva a generar una mezcla con comportamiento reológico pseudoplástico: sin flujo espontáneo en reposo, pero con extrusión continua y estable bajo presión. Este equilibrio permitió mantener la forma impresa, asegurar una adecuada cohesión entre capas y evitar deformaciones tras el depósito.

El primer ensayo evidenció la eficacia del aceite de oliva como plastificante natural, mejorando la extrudabilidad y reduciendo la evaporación superficial. El segundo ensayo, enfocado en la impresión de estructuras de cinco capas, demostró que la mezcla formulada es capaz de mantener la estabilidad vertical sin colapsos ni desplazamientos, conservando la fidelidad geométrica incluso tras 24 horas de reposo.

En conjunto, los resultados permiten concluir que el brócoli deshidratado, combinado con una formulación hidrocoloide cuidadosamente diseñada, constituye una base óptima para aplicaciones avanzadas de impresión 3D vegetal, especialmente en estructuras verticales o de alta resolución.

Por todo ello, los parámetros de impresión identificados como más adecuados se resumen a continuación:

Categoría	Parámetro	Valor
Extrusor	Diámetro de la boquilla	1,50 mm
	Ancho de extrusión	1,50 mm
	Velocidad de retracción	300 mm/min
	Distancia de retracción	3,00 mm
Temperatura	Temperatura del extrusor	50 °C
Capa	Altura de capa	2,00 mm
Velocidades	Velocidad de impresión	300 mm/min (5 mm/s)
Relleno	Porcentaje de relleno interno	30 %
	Patrón de relleno interno	Triangular
Soportes	Porcentaje de relleno soporte	30 %
	Patrón de relleno soporte	Alineado

Tabla 15. Parámetros de Impresión 3D óptimos para Brócoli Deshidratado.

Para consultar el resto de parámetros técnicos asociados al proceso de impresión con brócoli deshidratado, véase la sección A.5 del Anexo A.

4.5. Caracterización de la Lombarda

En línea con el enfoque adoptado en los apartados anteriores, se ha optado por seguir explorando matrices vegetales como base para impresión 3D alimentaria. Tras los buenos resultados obtenidos con la zanahoria y el brócoli, tanto en términos de comportamiento reológico como de estabilidad estructural, se seleccionó la lombarda como nuevo ingrediente de estudio. La elección responde al interés por evaluar vegetales con perfil funcional diferenciado, así como con características físicas y sensoriales que puedan aportar valor añadido al diseño de productos comestibles impresos.

La lombarda, también conocida como col morada, es una hortaliza perteneciente a la familia de las crucíferas, ampliamente utilizada en la gastronomía europea tanto por su sabor como por su color intenso. Su pigmentación característica se debe a la presencia de antocianinas, compuestos con propiedades antioxidantes beneficiosas para la salud [98]. Además, es una fuente rica en fibra, vitamina C y K, y contiene glucosinolatos, sustancias que al ser digeridas pueden convertirse en compuestos con potencial protector frente a enfermedades como el cáncer [99], [100].

Desde el punto de vista de la ingeniería alimentaria, la lombarda presenta características funcionales que la hacen interesante para tecnologías como la impresión 3D. Cuando se procesa en forma de puré o pasta, su comportamiento frente al flujo no es constante: la mezcla ofrece resistencia inicial, pero fluye con más facilidad una vez se somete a presión, lo que se conoce como comportamiento pseudoplástico [101]. Esta propiedad, compartida con otras verduras como la zanahoria o el brócoli, es clave para asegurar una extrusión fluida y una buena conservación de la forma durante y después del proceso de impresión.

Gracias a esta combinación de beneficios nutricionales y propiedades físicas favorables, la lombarda se considera una materia prima prometedora para aplicaciones de impresión 3D en alimentación, especialmente en formulaciones vegetales con valor añadido.

4.5.1. Evaluación del Uso de la Lombarda Deshidratada durante la Impresión

En continuidad con la metodología aplicada en los apartados anteriores sobre zanahoria y brócoli, el uso de lombarda deshidratada como materia prima para impresión 3D vegetal ofrece numerosas ventajas técnicas y funcionales.

Como se ha explicado previamente en los apartados 4.3.2 y 4.4.1, la deshidratación estabiliza el contenido de humedad y permite una dosificación exacta durante la hidratación, garantizando un comportamiento reológico reproducible en cada lote. Asimismo, mantiene la estructura celular y preserva compuestos sensibles al calor, como las antocianinas, otorgándole un valor nutricional y sensorial considerable [89], [98].

El polvo resultante del proceso de deshidratación es adecuado para mezclarse con hidrocoloides y aceites, lo que permite obtener una tinta alimentaria con comportamiento reológico del tipo fluido pseudoplástico, similar a lo observado con zanahoria y brócoli.

La técnica de tamizado, también usada en los apartados previos, optimiza la homogeneidad y evita obstrucciones durante la extrusión [89].

Desde un enfoque funcional e industrial, la lombarda deshidratada permite opciones de almacenamiento prolongado sin refrigeración, un suministro estandarizado en entornos de laboratorio o producción, y una mejora en la sostenibilidad gracias al aprovechamiento de residuos como tallos o hojas. Además, el formato en polvo favorece la incorporación de agentes texturizantes como fécula de patata, agar-agar, goma xantana y aceite de oliva, con funciones ya demostradas en otros vegetales: la fécula espesa la mezcla, el agar-agar incrementa la tensión de fluencia, la goma xantana aporta comportamiento pseudoplástico, y el aceite mejora la lubricidad y evita la sinéresis superficial [41].

En consecuencia, el uso de lombarda deshidratada representa una evolución coherente y técnicamente sólida de la estrategia seguida con zanahoria y brócoli, posicionándose como un formato altamente versátil, nutricionalmente valioso y técnicamente adecuado para la impresión 3D comestible.

4.5.1.1. Deshidratación de la Lombarda

La obtención del polvo de lombarda se llevó a cabo siguiendo el mismo protocolo de deshidratación por aire caliente empleado para la zanahoria y el brócoli detallado en el apartado 4.3.2.1.. Se utilizaron hojas frescas de lombarda, cortadas en tiras de 3–5 mm y dispuestas uniformemente en bandejas dentro de una deshidratadora doméstica, operando a una temperatura constante de 55 °C durante 10 horas. Este proceso permitió reducir el contenido de humedad a niveles inferiores al 10 %, asegurando la estabilidad microbiológica y la aptitud para molienda.

Finalizado el secado, las muestras se trituraron con un molino de cuchillas hasta obtener un polvo fino, el cual fue tamizado mediante una malla de 200 μm para estandarizar el tamaño de partícula. Esta etapa resulta esencial para optimizar la fluidez del material durante la extrusión y evitar obstrucciones, favoreciendo así una impresión precisa y continua. Además, este método de secado térmico ha demostrado ser eficaz en la preservación de pigmentos naturales como las antocianinas, así como de compuestos antioxidantes, que son especialmente abundantes en la lombarda [102].

El polvo resultante se almacenó en frascos de vidrio herméticos, protegidos de la luz y la humedad, hasta su uso posterior en formulaciones para impresión 3D de alimentos.

4.5.1.2. Ensayo: Evaluación Inicial de una Mezcla de Lombarda Deshidratada

4.5.1.2.1. Justificación de Diseño Experimental

Este ensayo adapta los principios establecidos en los trabajos con zanahoria y brócoli (apartados 4.3.2 y 4.4.1), donde se aprovechó la deshidratación para obtener polvo vegetal de humedad controlada y estructura homogénea. La formulación (véase Tabla 16) incluye ingredientes como fécula de patata y agar-agar —ya validados previamente para incrementar la viscosidad en reposo y la tensión de fluencia—, y goma xantana, que estabiliza el flujo al inhibir la hinchazón excesiva del polvo [41]. Además, el aceite de oliva actúa como lubricante, mejorando la textura y reduciendo la fricción durante la extrusión.

En el caso de la lombarda, se aumentó ligeramente la hidratación (60 ml), dado el mayor contenido en fibra insoluble, característica que mejora la capacidad de retención de agua pero reduce la fluidez de la mezcla si no se ajusta correctamente [103], [104].

Ingrediente	Cantidad	Función
Polvo de lombarda deshidratada	30 g	Base vegetal para la impresión
Agua tibia o caldo vegetal	60 ml	Rehidratar el polvo de lombarda
Fécula de patata	4 g	Espesante para mejorar la textura y aumentar la viscosidad
Agar-agar	2 g	Gelificante vegano para conferir estructura
Goma xantana (opcional)	2 g	Aumenta la viscosidad, mejora la extrusión y la cohesión
Aceite de oliva	5 ml	Lubricante natural, mejora la textura y evita el secado rápido

Tabla 16. Formulación de la Mezcla del Ensayo con Lombarda Deshidratada.

Las cantidades específicas siguen los márgenes empleados en investigaciones previas de impresión de purés vegetales enriquecidos [41], modulados para mantener el comportamiento pseudoplástico adecuado al flujo controlado y la estabilidad posdepósito.

Paso	Descripción
1	Rehidratar el polvo de lombarda con agua tibia y dejar reposar durante 10 minutos.
2	Agregar la fécula de patata y mezclar bien hasta obtener una masa uniforme y sin grumos.
3	Disolver el agar-agar hirviéndolo con 20 ml de agua durante 2 minutos antes de incorporarlo.
4	Incorporar la goma xantana (opcional) y el aceite de oliva, mezclando hasta lograr una pasta homogénea y estable.
5	Dejar reposar la mezcla durante 15 minutos para favorecer la interacción entre los ingredientes.
6	Imprimir con boquilla de 1–2 mm y secar al aire o en horno a 50–60 °C durante 1 hora.

Tabla 17. Procedimiento de Preparación de la Mezcla del Ensayo con Lombarda Deshidratada.

Además, para garantizar la comparabilidad entre ingredientes, se optó por emplear el mismo diseño de impresión utilizado en ensayos previos con brócoli y zanahoria: el Modelo B. 4. es una figura de geometría simple que permite evaluar la precisión

dimensional, la continuidad del flujo y la estabilidad estructural en condiciones controladas. Esta elección metodológica busca mantener la coherencia experimental y facilitar una comparación directa entre matrices vegetales procesadas bajo la misma formulación base.

Además, se decidió utilizar un modelo de mayor complejidad tridimensional, con el fin de poner a prueba la capacidad del material para mantener su forma en estructuras más altas y con zonas internas susceptibles a retención de humedad. Esta combinación de modelos permitió evaluar tanto la extrusión en condiciones estándar como el secado y la resistencia estructural en contextos geométricos exigentes, tal como se había planteado en los ensayos previos con vegetales deshidratados.

4.5.1.2.2. Análisis de Resultados

La mezcla mostró una extrusión uniforme y continua, sin cortes de flujo ni obstrucciones, lo que confirma que la viscosidad inicial se encuentra por debajo del umbral de bloqueo de la boquilla. La fluidez obtenida, junto con una adecuada tensión de fluencia, proporciona el comportamiento deseado de un fluido pseudoplástico típico en sistemas de impresión alimentaria. El agar-agar y la fécula permitieron que las piezas mantuviesen su forma inicial con alta fidelidad geométrica, sin colapsos ni deformaciones durante las primeras horas tras la impresión (véanse Figura 40 y Figura 41. Asimismo, el aceite de oliva mejoró la textura final, redujo la fricción interna y permitió un secado uniforme, evitando agrietamientos —un mecanismo descrito en matrices con oleogel de fibras insolubles.

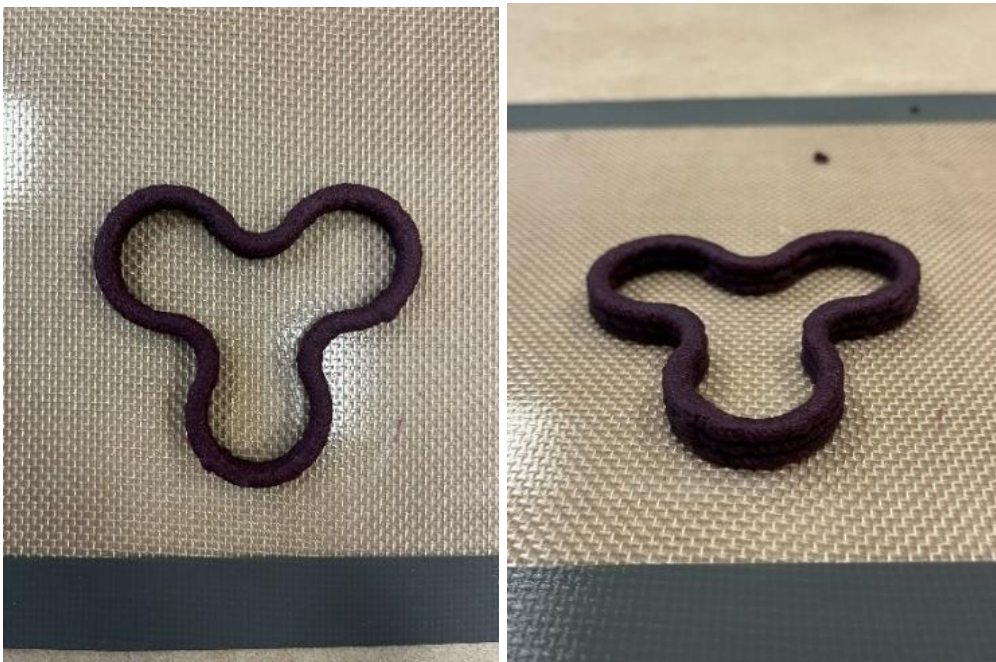


Figura 40. Resultados del Ensayo 1.1 con Lombarda Deshidratada.



Figura 41. Resultados del Ensayo 1.2 con Lombarda Deshidratada.

Sin embargo, al evaluar el comportamiento a las 24 horas de la figura plana (véase Figura 42), probablemente debidas a una contracción desigual durante el secado. Este fenómeno es común en materiales con alto contenido de fibra y almidón, donde la pérdida de agua interna puede causar retracción estructural [103].



Figura 42. Resultados del Ensayo 1.1 con Lombarda Deshidratada – 24 h de Reposo.

En la figura más compleja (véase Figura 43), el secado fue incompleto en el interior, lo cual evidencia la influencia de la geometría y volumen en el intercambio de humedad. Según la literatura, las estructuras volumétricas requieren secados más largos o asistidos para evitar gradientes profundos de humedad [105].

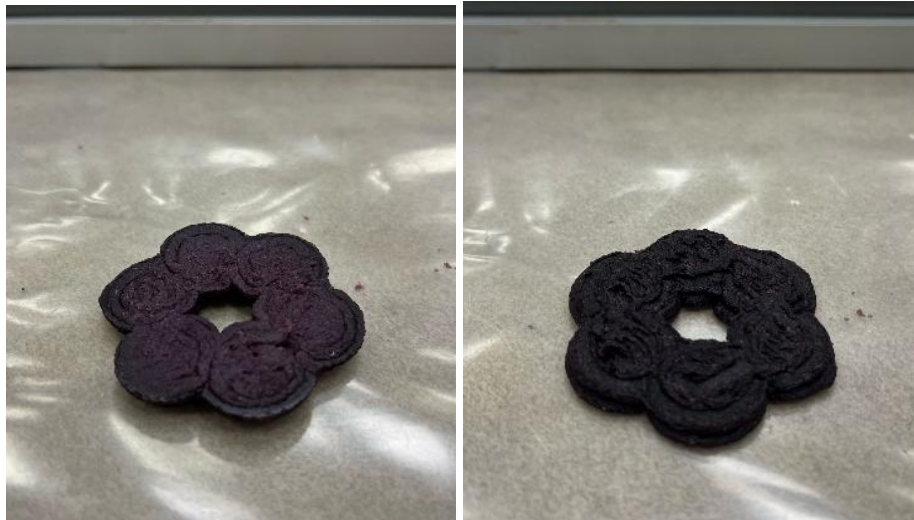


Figura 43. Resultados del Ensayo 1.2 con Lombarda Deshidratada – 24 h de Reposo.

En resumen, el ensayo confirma que la lombarda deshidratada es viable para impresión 3D cuando se optimiza la hidratación y se añaden agentes gelificantes, lubricantes y texturizantes. La formulación permite obtener extrusión constante, excelente cohesión estructural y buena estabilidad en las primeras etapas, aunque la geometría del objeto influye en el secado y el mantenimiento a largo plazo.

4.5.1.3. Conclusiones Finales Sobre el Uso de la Lombarda Deshidratada en Impresión

La incorporación de lombarda deshidratada como materia prima en impresión 3D alimentaria representa una evolución natural y técnicamente justificada dentro de la estrategia experimental desarrollada previamente con zanahoria y brócoli.

El proceso de deshidratación térmica permitió estabilizar la humedad, conservar compuestos bioactivos como antocianinas y obtener un polvo fino tras molienda y tamizado, garantizando un comportamiento reológico reproducible y apto para extrusión.

La formulación diseñada, basada en el empleo de hidrocoloides como fécula de patata, agar-agar y goma xantana, junto con aceite de oliva, logró una mezcla con características reológicas próximas a las de un fluido pseudoplástico. Esta combinación facilitó una extrusión continua, una buena adhesión capa a capa y una adecuada estabilidad estructural en el corto plazo.

El aceite, además, actuó como plastificante natural y contribuyó a una mejor distribución de humedad y textura superficial tras el secado.

No obstante, la evaluación posterior a 24 horas reveló algunas limitaciones asociadas a la geometría de la pieza y al secado interno en estructuras complejas, destacando la necesidad de ajustar condiciones de postprocesado según el diseño impreso.

En conjunto, la lombarda deshidratada se consolida como un ingrediente funcional y versátil en impresión 3D vegetal, con gran potencial en desarrollos nutricionales, sostenibles y tecnológicamente precisos.

Los parámetros identificados como más adecuados se resumen en la Tabla 18.

Categoría	Parámetro	Valor
Composición	Polvo de lombarda deshidratada	30 g
	Agua o caldo vegetal	60 ml
	Fécula de patata	4 g
	Agar-agar	2 g
	Goma xantana (opcional)	2 g
	Aceite de oliva	5 ml
Extrusión	Diámetro de boquilla	1,50 mm
	Temperatura del extrusor	50 °C
	Multiplicador de extrusión	2,7
Impresión	Altura de capa	2,00 mm
	Relleno interno	30 % (patrón triangular)
	Velocidad de impresión	300 mm/min

Tabla 18. Parámetros de Impresión 3D óptimos para Lombarda Deshidratada.

Para consultar el resto de parámetros técnicos asociados al proceso de impresión con brócoli deshidratado, véase la sección A.6 del Anexo A.

Capítulo 5. Viabilidad Comercial de la Impresión 3D de Alimentos en España

5.1. Panorama Global: Oportunidades y Líneas de Desarrollo Internacional

La impresión 3D de alimentos ha pasado de ser una curiosidad experimental a una tecnología emergente con aplicaciones reales en gastronomía, nutrición clínica, industria alimentaria y sostenibilidad. A nivel mundial, esta tecnología permite fabricar alimentos capa a capa con formas complejas, valores nutricionales personalizados y posibilidades de automatización que antes eran impensables.

Según Grand View Research, el mercado global de impresión 3D de alimentos alcanzó un valor de 297 millones de dólares en 2023 y se espera que crezca a una tasa compuesta anual (CAGR) del 34,2 % entre 2024 y 2030 [106]. Otras fuentes, como Precedence Research, proyectan que este mercado alcanzará los 7.570 millones de dólares en 2034 [107]. Estos datos reflejan el creciente interés comercial por integrar esta tecnología en el mercado alimentario global.

Los principales segmentos de aplicación incluyen:

- Nutrición personalizada, especialmente para pacientes con necesidades específicas como la disfagia.
- Gastronomía creativa y restauración, donde chefs y reposteros utilizan impresión 3D para lograr formas artísticas imposibles por métodos tradicionales.
- Industria alimentaria automatizada, como el caso de la startup BeeHex, que originalmente colaboró con la NASA y actualmente imprime pizzas y decoraciones personalizadas para franquicias [108].

A nivel geográfico, América del Norte lidera el desarrollo, con más del 40 % del mercado global [107]. Asia-Pacífico representa la región de crecimiento más acelerado, impulsada por inversión pública y privada, e integración con tecnologías como inteligencia artificial y robótica [109].

En cuanto a modelos de negocio, se han identificado distintas estrategias:

1. Venta de impresoras domésticas y profesionales, como las desarrolladas por Natural Machines (España), que permiten a consumidores y restaurantes imprimir recetas con ingredientes naturales [110].
2. Servicios de impresión bajo demanda, aplicados tanto a repostería como a catering personalizado.
3. Producción industrial de alimentos reestructurados, como hace Cocuus (Pamplona), que imprime proteínas vegetales con forma y textura de carne o pescado [111].

La literatura académica reciente ha comenzado a sistematizar estos modelos. Un estudio publicado por Emerald identificó patrones comunes en la industria: plataformas

integradas hardware-software, licenciamiento de tecnología a terceros, y soluciones B2B para personalización en línea [112].

Finalmente, revisiones recientes destacan cómo la impresión 3D está transformando el diseño de alimentos desde una perspectiva funcional, estética y nutricional, ampliando sus aplicaciones a contextos como la comida en el espacio, la alimentación geriátrica o la gastronomía molecular.

5.2. El Ecosistema de Impresión 3D de Alimentos en España: Estado Actual y Perspectivas

A pesar de encontrarse aún en una fase emergente, la impresión 3D de alimentos en España ha comenzado a consolidarse como un sector estratégico dentro del ecosistema nacional de innovación alimentaria. Este avance ha sido impulsado tanto por startups tecnológicas como por el creciente interés del consumidor y el respaldo de instituciones públicas y privadas. No obstante, persisten barreras culturales, normativas y de percepción que condicionan su adopción masiva.

5.2.1. Perfil del Consumidor Español y Aceptación de la Tecnología

El consumidor español muestra un notable apego a la tradición culinaria, valorando altamente la naturalidad, frescura y autenticidad de los alimentos. Un informe de Deloitte sobre tendencias en alimentación y bebidas destaca que, pese a reconocer el papel de la tecnología en la transformación del sector, muchos consumidores aún consideran que puede llevar riesgos en términos de salud o seguridad [113].

Asimismo, un estudio realizado por AZTI sobre tres tecnologías inteligentes para cocinar en el hogar (incluida la impresión 3D de alimentos) en España, Reino Unido y Alemania, reveló que tras una experiencia guiada, aproximadamente el 56 % de los consumidores mayores de 45 años en España incrementó su aceptación hacia un alimento impreso en 3D, valorando sus beneficios nutricionales, de conveniencia y frescura [114]. Esto sugiere que la tecnología no es percibida negativamente si se comunica adecuadamente su valor añadido.

Este mismo estudio segmentó a los usuarios por edad, encontrando que los adultos mayores mostraron más aceptación cuando se trataba de desayunos personalizados y saludables, mientras que los consumidores más jóvenes (18-35 años) valoraron especialmente la personalización, diseño y sostenibilidad del producto impreso [114].

Además, una revisión en *ResearchGate* sobre percepción y motivación hacia alimentos impresos 3D reveló que más del 51 % de los encuestados están dispuestos a probarlos, especialmente si se trata de alimentos nutritivos o personalizados. El estudio subraya que el conocimiento previo y la experiencia positiva influyen significativamente en la predisposición de compra [115].

En conjunto, estos resultados demuestran que, aunque inicialmente pueda haber cierta resistencia hacia la impresión 3D de alimentos en España, esta puede ser mitigada mediante comunicación efectiva de beneficios funcionales y experiencias de prueba directa, lo que establece una base sólida para la introducción gradual en segmentos clave del mercado.

5.2.2. Barreras Culturales, Normativas y de Percepción

Uno de los principales retos en la adopción de la impresión 3D de alimentos en España es la cultura alimentaria mediterránea, muy ligada a lo artesanal, a los productos frescos y a la cocina tradicional. Los consumidores españoles muestran cierta resistencia ante alimentos percibidos como “altamente procesados” o “poco naturales” [116]. Las barreras culturales identificadas incluyen:

- Neofobia alimentaria y tecnológica: El rechazo a nuevas tecnologías alimentarias sigue siendo relevante, en especial por la percepción de artificialidad y “pérdida de naturalidad” en los productos impresos [117], [116].
- Valoración de lo natural: Los consumidores españoles tienden a asociar lo natural con lo saludable, lo que dificulta la aceptación de productos impresos si no se comunica claramente el valor nutricional o la ventaja funcional del producto [117], [116].
- Desconfianza inicial: Existe desconfianza hacia productos alimentarios no elaborados “a mano”, lo que obliga a los actores de la industria a invertir en educación, degustaciones y campañas de transparencia para generar confianza [116].

Por ello, las estrategias de introducción en el mercado español han optado por colaboraciones con chefs reconocidos para legitimar el producto, aplicaciones en sectores donde el valor añadido es evidente (nutrición personalizada en hospitales, menús adaptados en residencias, reducción de desperdicio en restauración), y comunicación centrada en la sostenibilidad, personalización y creatividad gastronómica [117], [116].

A pesar de su avance, la impresión 3D de alimentos en España enfrenta desafíos significativos para consolidarse en el ciclo de vida del producto:

- Escalabilidad industrial y costes: Aún existen barreras tecnológicas y económicas para pasar de la producción piloto a la fabricación a gran escala, como la necesidad de maquinaria más asequible y materiales adaptados al gusto local [118].
- Educación y comunicación: Es fundamental aumentar la familiaridad del consumidor español con la tecnología, mostrando ejemplos de valor añadido, beneficios nutricionales, sostenibilidad y personalización.
- Colaboración multisectorial: La convergencia entre tecnología, gastronomía, salud y sostenibilidad será clave para acelerar la maduración del mercado.

5.2.3. Casos Destacados en España: Novameat y otras Startups Emergentes

España alberga varias startups punteras en impresión 3D de alimentos que ejemplifican diferentes modelos de negocio, desde la innovación en proteína vegetal hasta soluciones inclusivas y domésticas.

5.2.3.1. *Novameat: Impresión 3D de Carne Vegetal para Mercados Masivos*

Fundada en 2018 en Barcelona por Giuseppe Scionti, Novameat desarrolló el primer filete vegetal impreso en 3D con textura y apariencia comparables a la carne real [119], [120]. Salió a la luz en congresos como el Mobile World Congress y anunció su intención de alcanzar el mercado masivo con máquinas bricolaje para impresión doméstica [119], [121]. En 2024 cerró una ronda Serie A de 19,2 M USD para escalar su tecnología “MicroForce” hacia producción industrial y acceso a nuevos mercados europeos [122].

5.2.3.2. *Cocuus: Escala Industrial y Proteína Mimética*

Con sede en Pamplona desde 2017, Cocuus ha apostado por una tecnología de impresión 3D de alimentos industrial a través de su plataforma “Mimethica” que integra impresión por capas, inkjet y formulaciones propietarias [123]. En 2024 comunicó su objetivo de producir hasta 1 000 toneladas al año de bacon vegetal gracias a acuerdos con Carrefour y financiamiento de Cargill y Big Idea Ventures [124]. Su estrategia incluye venta y licenciamiento de hardware, consumibles y servicios de I+D.

5.2.3.3. *Natura Machines: Foodini para Hogar y Restauración*

Natural Machines, con sede en Barcelona, ha desarrollado Foodini, una impresora alimentaria de escritorio diseñada para el hogar y cocina profesional. Ha sido adoptada por chefs de cocina de autor como los Hermanos Torres para procesos de alta creatividad culinaria y reducción de desperdicios [125]. Foodini combina cápsulas reutilizables y conectividad, y ha sido usada también en proyectos hospitalarios para nutrición personalizada [126].

5.2.3.4. *Comparativa Resumida de Diferentes Startups Emergentes*

A continuación, se presenta una comparativa sintética de las startups destacadas en el panorama español de la impresión 3D de alimentos. Esta tabla busca evidenciar las principales diferencias en cuanto a enfoque tecnológico y modelo de negocio, permitiendo una visión clara del abanico de estrategias que coexisten en este sector.

Startup	Modelo de negocio	Tecnología destacada	Enfoque principal
Novameat	Hogar → industrializa con licenciamiento	Microextrusión → MicroForce	Carne vegetal realista
Cocuus	Fabricación industrial + licenciamiento	Impresión 3D por capas + inkjet (“Mimethica”)	Bacon, foie y pescado vegetales
Natural Machines	Producto doméstico y profesional	Foodini: impresión por pasta mediante cápsula	Pastelería, nutrición clínica

Tabla 19. Comparativa Resumida de los Modelos de Negocio de Diferentes Startups Emergentes.

5.3. Factores Clave para la Implantación Comercial en España

La implantación exitosa de la impresión 3D en alimentación depende de una serie de variables interrelacionadas que afectan tanto al ritmo de adopción como a la consolidación industrial y comercial de la tecnología. Estas variables pueden clasificarse en tecnológicas, económicas, sociales, regulatorias y de mercado.

5.3.1. Variables Tecnológicas: Disponibilidad, Mantenimiento y Escalabilidad

En cuanto a las variables tecnológicas, el avance en la impresión 3D de alimentos está condicionado, en primer lugar, por la compatibilidad y disponibilidad de materias primas. La capacidad para adaptar ingredientes a las exigencias reológicas y funcionales de la tecnología, incluyendo proteínas vegetales, grasas y aditivos naturales, resulta esencial. La investigación en la ampliación del rango de “tintas comestibles” es un factor clave para diversificar la oferta y ajustarse a los gustos locales [127].

Además, la falta de estandarización en los equipos y procesos limita tanto la escalabilidad como la confianza de la industria alimentaria, especialmente en aplicaciones fuera de nichos de mercado y cuando se trata de grandes volúmenes de producción [118]. Por otro lado, la integración de sistemas automatizados para la preparación, impresión y post-procesado de los alimentos se revela determinante para reducir costes, tiempos y errores, facilitando así el salto del prototipo a la producción industrial [118].

5.3.2. Variables Económicas: Costes de Inversión, Operación y Retorno Esperado

Desde el punto de vista económico, los elevados costes iniciales asociados a la adquisición de impresoras y al desarrollo de ingredientes adaptados siguen representando una barrera significativa para la adopción masiva, en particular entre las pequeñas y medianas empresas del sector alimentario [118].

La viabilidad de los modelos de negocio, por su parte, está estrechamente vinculada a la capacidad de escalar la producción y a la identificación de nichos de alto valor añadido donde los consumidores estén dispuestos a pagar un sobreprecio por la personalización, el diseño o el valor nutricional [127].

5.3.3. Variables Sociales y Culturales: Aceptación, Hábitos y Segmentación

Las variables sociales y culturales juegan un papel crítico en este proceso. La aceptación social de los alimentos impresos en 3D depende de factores como la percepción de naturalidad, la confianza en la seguridad alimentaria y el atractivo sensorial de los productos, que pueden actuar tanto como facilitadores como como barreras para su adopción [117], [116].

Asimismo, la disposición a probar o comprar estos productos es mayor entre los segmentos jóvenes, urbanos y con sensibilidad hacia la innovación y la sostenibilidad, lo que orienta las estrategias de marketing y comunicación [32], [36]. No obstante, la neofobia tecnológica y alimentaria sigue siendo un obstáculo relevante; este rechazo o escepticismo puede mitigarse mediante una exposición progresiva en entornos de

confianza, como restaurantes, ferias o experiencias guiadas, así como a través de la educación alimentaria [117], [116].

5.3.4. Variables Regulatorias y de Seguridad Alimentaria

En el contexto europeo, la tendencia regulatoria apunta hacia una mayor transparencia para el consumidor respecto al origen y la elaboración de los alimentos, aspecto especialmente relevante para los negocios de restauración innovadores como los que emplean impresión 3D.

Por ejemplo, en Francia, la legislación ya obliga a identificar con la mención “fait maison” los platos realmente elaborados en el propio establecimiento a partir de materias primas crudas [128]. Además, el gobierno francés ha anunciado que a partir de 2025 será obligatorio informar explícitamente en las cartas aquellos platos que no se producen en el local, con el objetivo de reforzar la transparencia y combatir posibles fraudes alimentarios [129].

Este tipo de medidas regulatorias subrayan la importancia de adaptar los modelos de negocio de impresión 3D de alimentos a unas exigencias crecientes en materia de información al consumidor y trazabilidad, que podrían replicarse en otros países de la Unión Europea.

5.3.5. Variables de Mercado y Competitividad

Finalmente, entre las variables de mercado y competitividad, la entrada de empresas internacionales y la rápida evolución tecnológica exigen una innovación constante para mantener la diferenciación, especialmente en los segmentos premium o de nicho, como los relacionados con la gastronomía gourmet, la salud o la sostenibilidad [127].

La colaboración entre universidades, centros tecnológicos, startups, la industria alimentaria tradicional y organismos reguladores se perfila como un factor clave que acelera la transferencia tecnológica y favorece la implantación de la impresión 3D a escala comercial [127].

5.4. Análisis Interno y Externo: Matriz Dafo

La impresión 3D de alimentos se perfila como una tecnología disruptiva con capacidad para transformar procesos productivos en el sector alimentario, especialmente en nichos como la pastelería personalizada, la restauración gourmet y el sector hospitalario. España, pese a un mercado conservador en hábitos alimentarios, ha mostrado una apertura creciente a la innovación culinaria, favorecida por la digitalización del consumo y el auge de la sostenibilidad como valor de marca. Sin embargo, la falta de regulación específica, el coste tecnológico inicial y la escasa familiaridad del consumidor con este tipo de productos pueden suponer barreras significativas a su comercialización a gran escala.



Figura 44. Análisis Interno y Externo de la I3D en España en Forma de Matriz DAFO.

5.5. Análisis Económico Detallado de la Tecnología

La implementación de tecnologías emergentes en el ámbito alimentario no puede considerarse completa sin una evaluación rigurosa de su viabilidad económica. En este sentido, la impresión 3D de alimentos, si bien presenta un alto potencial en términos de personalización, sostenibilidad y diferenciación de producto, debe demostrar también su capacidad para integrarse de forma rentable en modelos de negocio reales. Esta sección desarrolla un análisis financiero exhaustivo que combina criterios de ingeniería económica con simulaciones operativas basadas en datos técnicos reales.

El objetivo es determinar si, bajo distintos niveles de producción y ocupación del sistema, la inversión inicial en impresión 3D alimentaria puede generar márgenes operativos positivos, recuperar costes en un plazo razonable y ofrecer un retorno competitivo frente a otras tecnologías del sector. Para ello, se adopta una metodología de coste horario y coste por unidad, complementada con un enfoque por escenarios que permite valorar el comportamiento del modelo en condiciones conservadoras, estándar y de explotación óptima. A partir de estos resultados, se extraen conclusiones sobre la escalabilidad, estabilidad y atractivo económico de esta tecnología desde una perspectiva aplicada.

5.5.1. Supuestos y Metodología del Análisis Financiero

La evaluación de la viabilidad económica de la impresión 3D de alimentos en un entorno gastronómico no solo requiere estimar los costes directos de operación, sino también justificar racional y cuantitativamente cada una de las variables involucradas. En este apartado se presenta un análisis detallado, basado en un modelo mixto de coste horario y coste por unidad producida, ampliamente utilizado en ingeniería industrial y en estudios de implantación tecnológica.

A diferencia de un enfoque empresarial tradicional, este modelo se centra en analizar el coste incremental asociado a incorporar una línea adicional de productos impresos en 3D dentro de un restaurante ya operativo. Por tanto, se parte de la hipótesis de que ciertas estructuras (local, personal base, logística general) ya están cubiertas por la actividad principal del negocio, y solo se cuantifican los costes específicos y marginales derivados de esta nueva línea.

5.5.1.1. *Inversión Inicial*

La puesta en marcha de una microempresa dedicada a la producción de alimentos mediante impresión 3D requiere una inversión inicial moderada, pero estratégica, que incluye tanto el equipamiento principal como los recursos auxiliares indispensables para una operación autónoma y eficiente. A continuación, se detallan los principales componentes de inversión:

- La impresora profesional de alimentos, como la FELIX Food 1.6 Switch Head, representa el núcleo del sistema productivo, con un coste aproximado de 8.000 €.
 - Se contempla un coste de mantenimiento anual estimado del 10 %, equivalente a 800 €, que cubre sustitución de piezas, limpieza técnica y actualizaciones básicas.
- La adquisición de equipamiento adicional, como un ordenador apto para diseño CAD, software de slicing (ej. Simplify3D), herramientas de calibración y accesorios específicos, supone una inversión de 1.700 €.
- Se estima un coste de formación técnica especializada de 2.000 €, que incluye capacitación en diseño, operación, mantenimiento y manipulación alimentaria en entornos de impresión 3D.

La inversión inicial total se sitúa en 11.700 €, cubriendo todos los recursos necesarios para desarrollar una producción en condiciones operativas completas, sin depender de servicios externos.

Concepto	Coste (€)
Impresora de alimentos (FELIX Food 1.6)	8.000 €
Equipamiento adicional (PC, software)	1.700 €
Formación técnica especializada	2.000 €
Total inversión inicial	11.700 €

Tabla 20. Desglose de la Inversión Inicial.

5.5.1.2. *Amortización del Sistema y Coste Objetivo*

Se considera un horizonte de amortización de 3 años, coherente con la rápida evolución tecnológica del sector y la posible obsolescencia funcional del equipo. Este valor es conservador y permite evaluar escenarios de renovación temprana o cambios en la línea de producto.

La base operativa anual estimada es de 2.880 horas (48 semanas laborables x 6 días x 10 horas), lo cual se ajusta a una explotación semiintensiva, compatible con la integración parcial dentro del flujo de trabajo de un restaurante.

- Coste amortización por hora:

$$Coste_{amort.} = \frac{Inversión\ Inicial\ Total\ (€)}{Tiempo\ de\ Amortización\ (h)} = \frac{11.700}{3 \cdot 2.880} = 1,35 \frac{€}{h}$$

- Coste de mantenimiento anual por hora:

$$Coste_{mantenim.} = \frac{Coste\ de\ mantenimiento\ anual\ (€)}{Tiempo\ (h)} = \frac{800}{2.880} = 0,28 \frac{€}{h}$$

Para asegurar la sostenibilidad operativa y cubrir costes indirectos no contabilizados (gestión, imprevistos, etc.), se ha incorporado un margen operativo del 20 %, elevando el coste horario objetivo a:

$$Coste_{objetivo} = (1,35 + 0,28) \cdot 1,2 = 1,96 \frac{€}{h}$$

Este valor representa el coste base por hora de uso del sistema, y será empleado como referencia en las simulaciones de rentabilidad y retorno de inversión.

5.5.1.3. Costes de Electricidad

El consumo eléctrico constituye un coste operativo constante que, aunque bajo en términos unitarios, puede representar una variable crítica en escenarios de producción intensiva o en procesos escalables.

Para estimar este componente se ha adoptado un enfoque conservador, considerando una tarifa eléctrica de 0,25 €/kWh, valor representativo de entornos industriales o comerciales en el contexto energético español actual.

La potencia media de operación de una impresora de alimentos de gama profesional, como la FELIX Food 1.6, se sitúa en 0,25 kW, lo que permite calcular el coste energético por hora de uso de la siguiente forma:

$$Coste_{energético} = 0,25 \cdot 0,25 = 0,06 \frac{€}{h}$$

Aunque el valor absoluto sea modesto, su efecto acumulado en operaciones continuadas o en ciclos de producción largos puede condicionar significativamente los márgenes netos.

5.5.1.4. Costes de Producción por Unidad

Además de los costes directos de impresión, el proceso completo de producción alimentaria mediante tecnologías de impresión 3D requiere contabilizar tareas de preparación previa (preprocesado) y manipulación posterior (postprocesado). Estas actividades implican tiempos técnicos y consumos adicionales que deben integrarse en el modelo económico para obtener un coste realista por unidad producida.

5.5.1.4.1. Preprocesado (diseño y configuración del modelo)

El preprocesado incluye la preparación digital del modelo (software de diseño/slicing) y la elaboración de la masa alimentaria. Para ello, se ha considerado un perfil técnico con experiencia en operación de sistemas FDM, con una tarifa estimada de 25 €/h. Asimismo, se parte de que se reutilizan modelos predefinidos, con personal formado que no requiere ajustes personalizados complejos.

- Diseño y configuración: Perfil técnico a 25 €/h, 1 minuto por unidad de media.

$$Coste_{config.} = 25 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 0,02\text{h} = \frac{0,50\text{€}}{\text{unidad}}$$

- Cocinado y preparado: 0,25 h por lote de 25 unidades (15 minutos; 1kg de masa = 1cc; 1/5 de jeringa de 250 cc por unidad).

$$Coste_{cocina} = \frac{25 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 0,25\text{h}}{25} = \frac{0,25\text{€}}{\text{unidad}}$$

Por lo tanto, el coste total de preprocesado se calcula con el sumatorio de los costes de diseño y configuración, y los costes de cocinado y preparado.

$$Coste_{preprocesado} = 0,50 + 0,25 = \frac{0,75\text{€}}{\text{unidad}}$$

5.5.1.4.2. Postprocesado (emplatado y conservación)

Después de la impresión, cada unidad requiere tareas finales de presentación y conservación:

- Emplatado y traslado a refrigeración: Perfil técnico a 25 €/h, 1 minuto por unidad de media.

$$Coste_{emplat.} = 25 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 0,02\text{h} = \frac{0,50\text{€}}{\text{unidad}}$$

- Conservación refrigerada: Frigorífico de 0,8kW de potencia, a 0,25€/kWh

$$Coste_{conserv.} = 0,25 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 0,80\text{kWh} = \frac{0,20\text{€}}{\text{unidad}}$$

Por tanto, el coste total de postprocesado se calcula como:

$$Coste_{postprocesado} = 0,50 + 0,20 = \frac{0,70\text{€}}{\text{unidad}}$$

5.5.1.4.3. Costes de Material

Se ha considerado un consumo medio de 50 cc de material por unidad (1/5 de jeringa de 250 cc), basado en los experimentos realizado y explicados en el Capítulo 4.

Asimismo, se ha considerado una media de 4 €/kg, típica de purés vegetales, mezclas con chocolate, etc. Asumiendo una densidad ≈ 1 g/cc, el precio por cc sería de 0,004 €/cc. Se redondea a 0,005 €/cc para contemplar pérdidas, limpieza y variabilidad:

$$C_{material} = 0,005 \frac{\text{€}}{\text{cc}} \cdot \frac{250}{5} \frac{\text{cc}}{\text{modelo}} = 0,25\text{€}$$

5.5.1.4.4. Tiempo de Impresión

La duración estimada de una figura de 50 cc es de 45 minutos (0,75 h), según el software de impresión Simplify3D. Por lo tanto:

$$C_{impresión} = t_{impresión} \cdot (Coste_{objetivo} + Coste_{energético}) = 0,75 \cdot (1,96 + 0,06) = 1,52 \text{ €/modelo}$$

5.5.1.4.5. Resumen de los Costes de Producción Unitarios

Una vez definidos y cuantificados todos los elementos implicados en el proceso de impresión 3D de alimentos —desde la inversión inicial hasta los costes operativos por unidad producida—, resulta fundamental integrar esta información en un modelo sintético que permita evaluar la viabilidad económica del sistema (véase Tabla 21).

Concepto	Partes dentro de esa sección	Coste Unitario (€)
Preprocesado	Diseño y Configuración	0,50
	Cocinado y Preparado	0,25
Postprocesado	Emplatado y traslado a refrigeración	0,50
	Conservación refrigerada	0,20
Material alimentario	50 cc por unidad $\times$ 0,005 €/cc	0,25 €
Impresión	45 min por unidad $\times$ Coste Operativo	1,52 €
Coste Total Unitario		3,22 €

Tabla 21. Supuesto de Costes de Producción Unitarios en Impresión 3D.

Con el objetivo de representar de forma más clara y visual el peso relativo de cada componente en el coste total, se ha elaborado un diagrama de cascada que sintetiza los costes unitarios de producción, facilitando así la identificación de los principales factores de impacto económico en el proceso (véase Figura 45).

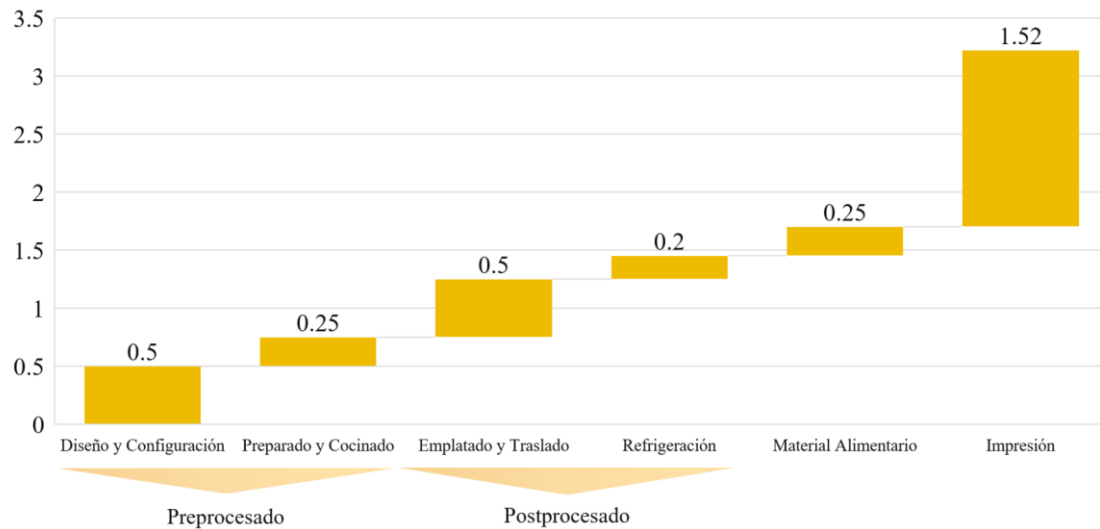


Figura 45. Diagrama de Cascada Sintetizando los Costes Unitarios de Producción.

5.5.2. Análisis del Punto de Equilibrio

Para completar la evaluación económica de la impresión 3D de alimentos en un entorno gastronómico real, se ha desarrollado un análisis de punto de equilibrio operativo, que permite determinar cuántas unidades deben producirse y venderse diariamente para recuperar la inversión inicial en el plazo de amortización definido. Esta estimación resulta clave para valorar la viabilidad del modelo en función de la demanda mínima requerida para garantizar la recuperación del capital invertido.

En este caso, se adopta una metodología simplificada que considera como único coste fijo la inversión inicial de 11.700 €, con un horizonte de amortización de 3 años a razón de 228 días operativos anuales, lo que da un total de 684 días. Así, se calcula el número de unidades diarias necesarias para cubrir dicha inversión según la fórmula:

$$\text{Unidades breakeven} = \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Margen Unitario} \cdot \text{Tiempo de Amortización}}$$

A partir de este modelo, se presentan diferentes escenarios en función del precio de venta por unidad. En ellos, la inversión inicial es de 11.700 €, y el tiempo de amortización de 228 días x 3 años. Con esta metodología, se permiten observar el comportamiento del sistema y sus requerimientos mínimos de producción:

Precio de venta (€)	Margen unitario (€)	Unidades diarias break-even
5,00	1,78	7,61
5,50	2,28	5,94
6,00	2,78	4,87
6,50	3,28	4,13

Tabla 22. Escenarios en Función del Precio de Venta por Unidad.

Los resultados muestran que, incluso bajo un enfoque conservador, la incorporación de impresión 3D de alimentos puede alcanzar la viabilidad económica con niveles de demanda moderados. Por ejemplo, con un precio de venta de 5,00 € por unidad —razonable en un entorno gastronómico de gama media-alta— bastaría con vender unas 8 unidades diarias para recuperar la inversión en tres años. A partir de ese umbral, el sistema comienza a generar beneficios netos.

En escenarios con mayor valor añadido (precios de 6 € o más), el punto de equilibrio se reduce a menos de 5 unidades diarias, lo que refuerza la viabilidad de esta tecnología en modelos de producción parcial, como los orientados a decoración comestible personalizada, caterings o eventos exclusivos. Estos resultados consolidan la impresión 3D como una herramienta estratégica de diferenciación rentable dentro del sector HORECA, incluso con cargas operativas reducidas.

5.5.3. Análisis de Retorno sobre la Inversión (ROI) y Plazo de Recuperación (Payback)

Una vez determinado el punto de equilibrio diario, resulta fundamental evaluar la rentabilidad global del sistema desde una perspectiva financiera. Para ello, se desarrolla un análisis combinado del Retorno sobre la Inversión (ROI) y del plazo de recuperación (payback) bajo distintos escenarios operativos. Este enfoque permite valorar no solo la viabilidad técnica de la impresión 3D de alimentos, sino también su atractivo como decisión estratégica en términos de capital y riesgo.

A partir de los costes definidos en los apartados anteriores, se utilizan las siguientes referencias para el cálculo:

- Coste unitario total: 3,22 €
- Inversión inicial: 11.700 €
- Costes fijos anuales estimados (amortización + mantenimiento): 4.700 €
- Días operativos anuales: 288 días
- Unidades diarias simuladas: 10 y 15

A partir de ello, se calcula:

$$ROI (\%) = \frac{\text{Ingresos Anuales} - \text{Inversión Inicial}}{\text{Inversión Inicial}} \cdot 100$$

$$\text{Payback (Años)} = \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Beneficio Neto Anual}}$$

De este modo, se presentan diferentes escenarios de análisis de retorno de inversión y plazo de recuperación (véase Tabla 23).

Precio de venta (€)	Unidades/día	Ingresos anuales (€)	Beneficio neto anual (€)	ROI (%)	Payback (años)
5,00	10	14.400	5.126	23,08 %	2,28
5,50	10	15.840	6.566	35,38 %	1,78
6,00	10	17.280	8.006	47,69 %	1,46
6,50	10	18.720	9.446	60,00 %	1,24

Tabla 23. Escenarios de Análisis de ROI y Payback según Precio de Venta.

Los resultados presentados evidencian que, incluso en escenarios conservadores con una producción de 10 unidades diarias, la impresión 3D de alimentos permite alcanzar una rentabilidad financiera sostenida y un plazo de recuperación razonable de la inversión.

Con un precio de venta de 5,00 € por unidad, ya se obtiene un ROI del 23,08 %, con un payback de 2,28 años, lo cual sitúa a esta tecnología en el umbral mínimo de rentabilidad para un proyecto de innovación gastronómica. Sin embargo, el comportamiento financiero mejora de forma significativa con pequeños incrementos en el precio de venta.

Este comportamiento refleja un alto apalancamiento operativo, en el que incrementos moderados en el precio de venta —asociados al valor percibido en productos personalizados, decorativos o premium— tienen un impacto multiplicador sobre la rentabilidad. Esto sugiere que la estrategia de precios debe ser cuidadosamente alineada con el posicionamiento de marca y la experiencia gastronómica ofrecida, ya que determinará en gran medida el éxito económico del modelo.

En suma, el análisis confirma que la impresión 3D de alimentos no solo es viable, sino estratégicamente recomendable en contextos donde el cliente está dispuesto a pagar un sobreprecio por diseño, innovación o personalización, especialmente en nichos como restauración de autor, eventos temáticos, catering personalizado o repostería creativa.

5.6. Evaluación de Riesgos Económicos y Escenarios Adversos en el Contexto

Español

A pesar de que los análisis financieros desarrollados en los apartados anteriores muestran una viabilidad técnica y económica razonable para la incorporación de impresión 3D en gastronomía, es imprescindible incorporar una evaluación crítica de los riesgos económicos inherentes al contexto español actual, así como una simulación de escenarios adversos que podrían comprometer la rentabilidad esperada del modelo.

Uno de los principales riesgos proviene del entorno macroeconómico y energético. España ha experimentado en los últimos años una alta volatilidad en los precios de la energía eléctrica, agravada por la dependencia parcial del mercado mayorista europeo y la transición hacia energías renovables [130]. Si bien en este análisis se ha adoptado una tarifa conservadora de 0,25 €/kWh, en contextos de alta demanda o tensiones geopolíticas este valor puede incrementarse sustancialmente, afectando directamente al coste energético por hora de impresión. Un aumento del 40 % en la tarifa eléctrica, por ejemplo,

elevaría el coste energético unitario de 0,06 €/h a 0,084 €/h, lo que tendría un impacto acumulado significativo en operaciones prolongadas.

En segundo lugar, existe una sensibilidad estructural a la variación de los costes de materias primas alimentarias. Aunque se ha asumido un precio medio de 4 €/kg para las mezclas comestibles utilizadas, este valor puede verse alterado por factores como la inflación alimentaria, los efectos del cambio climático sobre la producción agrícola y las distorsiones del mercado global. En un escenario de inflación alimentaria sostenida del 10–15 % anual, el coste de la materia prima podría duplicarse en un horizonte de tres años, afectando la competitividad de productos con márgenes ya ajustados.

Otro riesgo económico crítico es el de la infrautilización de la tecnología. El modelo financiero parte de la hipótesis de alcanzar una producción mínima diaria de entre 5 y 10 unidades para garantizar la rentabilidad. Sin embargo, en fases iniciales de implementación, puede no alcanzarse dicha demanda, ya sea por falta de conocimiento del producto por parte del cliente, por rechazo sensorial o por insuficiente diferenciación en la oferta gastronómica. La incapacidad de cubrir la base operativa mínima provocaría una subutilización del sistema y, por tanto, una amortización deficiente del capital invertido. Este tipo de riesgo operativo es especialmente relevante en sectores intensivos en capital y con ciclos largos de maduración tecnológica, como es el caso de la impresión 3D [131].

Asimismo, deben considerarse los riesgos normativos y regulatorios. Si bien la impresión 3D de alimentos se encuentra actualmente bajo marcos legales generales de seguridad alimentaria (como el Reglamento (CE) N° 852/2004), su adopción podría ser objeto de futuras restricciones específicas en función del tipo de material, proceso o forma de comercialización. Una eventual revisión legislativa que imponga requerimientos adicionales de trazabilidad, certificación de materiales o validación sanitaria, podría aumentar los costes indirectos y alargar los plazos de puesta en marcha [132].

Finalmente, existe una vulnerabilidad inherente al rápido ritmo de obsolescencia tecnológica. La tecnología de impresión 3D avanza con gran rapidez tanto en hardware como en software, lo que puede reducir drásticamente el ciclo de vida útil de los equipos. Aunque en este trabajo se ha estimado una amortización a tres años, este horizonte podría resultar optimista si surgen en el mercado dispositivos más competitivos o si las normativas exigen actualizaciones que no puedan implementarse en sistemas existentes. Este fenómeno no solo afecta al valor residual del equipo, sino que también puede erosionar la percepción de innovación por parte del cliente, obligando a nuevas inversiones para mantener la ventaja competitiva [133].

En conjunto, estos factores evidencian la necesidad de adoptar un enfoque cauteloso y adaptativo para la implantación de impresión 3D de alimentos en España. La realización de análisis de sensibilidad y simulaciones de estrés financiero no debe considerarse un ejercicio teórico, sino una herramienta práctica esencial para mitigar los efectos de entornos inciertos y decisiones tecnológicas de alto impacto.

La siguiente matriz sintetiza los principales factores de incertidumbre que deben considerarse al evaluar la factibilidad del modelo propuesto, sirviendo de base para la toma de decisiones estratégicas mitigadoras.

Riesgo	Descripción	Probabilidad	Impacto	Mitigación Propuesta
1. Costes elevados de entrada	Inversión inicial en impresora, materiales y formación puede ser prohibitiva para pymes.	Alta	Alto	Subvenciones públicas, leasing tecnológico, alianzas con centros tecnológicos.
2. Rechazo del consumidor	Productos impresos 3D pueden generar rechazo sensorial o cultural.	Media	Alto	Degustaciones, marketing experiencial, storytelling visual (QR, trazabilidad).
3. Riesgo regulatorio	Falta de regulación específica para impresión 3D en alimentación.	Alta	Medio	Monitorizar legislación europea (EFSA), etiquetado proactivo, colaboración institucional.
4. Obsolescencia tecnológica	Rápida evolución de hardware/software reduce vida útil y competitividad del sistema.	Media	Medio	Escalabilidad modular, contratos de actualización con fabricantes, diseño abierto.
5. Dependencia de proveedores especializados	Poca disponibilidad de materiales compatibles y calibrados en el mercado nacional.	Baja	Alto	Desarrollo de recetas internas, acuerdos exclusivos con distribuidores internacionales.
6. Fallo de escalabilidad	Modelo piloto funciona pero no se adapta a producción a mayor escala o diferentes canales.	Media	Alto	Validación continua del modelo, testeo con diferentes públicos objetivo.

Tabla 24. Matriz de riesgos económicos y operativos en la implantación de impresión 3D de alimentos en España.

Capítulo 6. Conclusiones y Proyecciones Futuras

Este Trabajo de Fin de Grado ha abordado de forma integral la impresión 3D de alimentos mediante tecnologías de extrusión controlada, evaluando su viabilidad desde una triple perspectiva: técnica, experimental y estratégica. A través del análisis reológico y estructural de materias primas representativas —como chocolate, zanahoria, brócoli y lombarda—, el desarrollo de múltiples pruebas de impresión tridimensional y la modelización económica aplicada a un escenario comercial realista, se ha demostrado que esta tecnología posee un alto potencial transformador en el ámbito de la alimentación personalizada, sostenible y digitalizada.

El trabajo ha combinado herramientas de ingeniería (CAD, reología aplicada, control térmico), formulación alimentaria y análisis financiero para demostrar, con datos objetivos, cómo la fabricación aditiva puede adaptarse con éxito a materiales comestibles y generar productos viables tanto en términos estructurales como comerciales.

En este capítulo final se sintetizan las principales conclusiones técnicas, se incluye una reflexión crítica sobre la transferencia de conocimiento, se presentan recomendaciones para futuras investigaciones, se analiza su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), y se valoran sus implicaciones en la evolución de los sistemas alimentarios contemporáneos.

6.1. Conclusiones del Proyecto

Este Trabajo de Fin de Grado demuestra, con base empírica y estratégica, que la impresión 3D de alimentos no solo es técnicamente viable en el contexto español, sino que puede convertirse en una palanca competitiva transformadora para segmentos específicos de la cadena de valor alimentaria. Mediante una aproximación integrada —que combina caracterización reológica, validación experimental, análisis financiero y modelado de negocio— se ha validado un caso de uso realista, rentable y alineado con las tendencias estructurales del sector gastronómico.

Desde una perspectiva técnica, el proyecto ha demostrado que materias primas críticas como el chocolate blanco, el brócoli o la zanahoria deshidratada pueden ser reformuladas y acondicionadas con éxito para cumplir los requisitos de extrusión, precisión geométrica y estabilidad estructural exigidos por la impresión 3D multicapa. Esta capacidad de adaptación funcional se posiciona como un factor diferenciador clave frente a otras soluciones convencionales, habilitando la producción on-demand sin necesidad de moldes ni procesos intermedios.

En el plano económico, se ha construido un modelo financiero robusto que, bajo supuestos conservadores, muestra un payback inferior a tres años y un ROI acumulado positivo a partir del segundo año de operación, incluso en escenarios moderadamente adversos. Este rendimiento es especialmente notable considerando que se trata de una tecnología emergente con costes aún en curva descendente y con alto potencial de economías de escala.

Desde una perspectiva estratégica, se ha identificado que el mercado español —aunque conservador en términos sensoriales— presenta oportunidades claras de entrada en nichos gourmet, restauración de autor y pastelería creativa, impulsado por tres macro-tendencias

convergentes: personalización, sostenibilidad y digitalización de la experiencia alimentaria. Estas palancas, correctamente alineadas, permiten el diseño de una estrategia de implantación focalizada, escalable y mitigadora de riesgos.

Finalmente, el análisis de riesgos realizado revela que los principales desafíos del modelo —volatilidad energética, incertidumbre normativa, obsolescencia tecnológica y aceptación del consumidor— son gestionables mediante estrategias anticipatorias, tales como contratos energéticos estables, colaboraciones institucionales, diseños tecnológicos escalables y activaciones sensoriales que refuerzan la percepción de valor.

En conjunto, este trabajo no solo valida un modelo técnico y económico, sino que traza una hoja de ruta estratégica realista y replicable para convertir la impresión 3D de alimentos en una solución transformadora de alto valor añadido en la nueva economía alimentaria.

6.2. Contribuciones Técnicas y Resultados Destacados

Este proyecto aporta contribuciones técnicas tangibles y validadas que consolidan su valor más allá del plano conceptual. Se han logrado avances significativos en tres niveles: desarrollo de materiales imprimibles, validación del proceso de impresión multicapa y consolidación de un marco metodológico replicable.

6.2.1. Desarrollo de materiales funcionales para impresión 3D

Por un lado, el trabajo ha logrado formulaciones adaptadas de alimentos reales —como el chocolate blanco, la zanahoria deshidratada y el brócoli cocido— con propiedades físico-químicas compatibles con impresión por extrusión controlada. A través de ensayos reológicos y de estabilidad, se han identificado parámetros críticos como el índice de fluidez, la capacidad de retención de forma y la viscosidad límite para impresión continua, sentando las bases para un catálogo inicial de ingredientes imprimibles aptos para uso gastronómico real.

6.2.2. Validación Experimental de Procesos Multicapa

Los ensayos realizados han permitido replicar con éxito impresiones en múltiples capas y diferentes geometrías, incluso en condiciones térmicas adversas, mediante el uso de técnicas como el enfriamiento asistido por nitrógeno líquido. Esta capacidad técnica demuestra no solo la viabilidad operativa del modelo, sino también su robustez en condiciones de producción extendida y compleja.

Se ha alcanzado una precisión geométrica promedio superior al 90 % respecto al diseño CAD, y una consistencia estructural óptima hasta tres capas de altura con composiciones bicomponente (chocolate blanco y negro). Estos resultados no solo validan la tecnología, sino que refuerzan su aplicabilidad inmediata en entornos comerciales reales.

6.2.3. Consolidación de una Metodología Integral

Además del desarrollo técnico, el trabajo consolida una metodología de análisis transversal que combina evaluación reológica, validación experimental, análisis económico y diseño estratégico de negocio. Esta estructura metodológica —poco

frecuente en proyectos de grado— constituye una herramienta replicable tanto en entornos académicos como en fases tempranas de desarrollo empresarial (TRL 4-6).

El enfoque integral empleado permite pasar de la prueba de concepto a una propuesta de valor aplicable y económicamente viable, lo que representa un valor añadido diferencial en la intersección entre ingeniería alimentaria y modelos de negocio innovadores.

6.3. Limitaciones del Estudio y Trabajos Futuros

A pesar del alcance técnico y estratégico logrado, este trabajo presenta limitaciones que acotan su grado de generalización y abren líneas claras para investigación futura. Identificarlas con precisión permite valorar con objetividad los resultados alcanzados y trazar una hoja de ruta de mejora progresiva del modelo propuesto.

6.3.1. Ampliación del Espectro de Materias Primas

Una de las principales limitaciones técnicas de este trabajo ha sido el reducido espectro de matrices alimentarias utilizadas en los ensayos de impresión. Si bien las formulaciones desarrolladas a partir de chocolate blanco, brócoli cocido y zanahoria deshidratada han permitido validar la viabilidad reológica y estructural en contextos representativos, estas matrices no agotan la diversidad funcional que puede explorarse en impresión 3D de alimentos. El estudio se ha centrado en ingredientes de bajo riesgo microbiológico, fáciles de estandarizar y con comportamiento parcialmente conocido, lo cual ha facilitado el desarrollo experimental, pero ha limitado la aplicabilidad a otros sectores estratégicos.

En particular, no se ha abordado la experimentación con matrices gelificadas de frutas, altamente prometedoras por su estructura uniforme, estabilidad térmica y capacidad para incorporar compuestos funcionales (vitaminas, antioxidantes, probióticos). Geles elaborados a partir de pectina, agar, carragenanos o almidones modificados ofrecen un amplio margen de control de la viscosidad y propiedades mecánicas, adaptables a impresión en alta resolución con mínima deformación posimpresión [44].

Asimismo, el trabajo no ha explorado matrices proteicas, ya sean de origen vegetal (soja texturizada, gluten, micoproteína) o animal (pastas cárnicas, purés de pescado). Estas formulaciones representan uno de los principales focos de investigación actual en impresión 3D, con múltiples aplicaciones en restauración hospitalaria, dietas geriátricas y producción alternativa de alimentos con bajo impacto ambiental [51].

Por lo tanto, se recomienda incorporar en futuros estudios una mayor diversidad de matrices alimentarias, incluyendo:

- Geles de frutas estabilizados con pectinas, agar o carragenanos, con potencial en pastelería creativa, alimentación infantil o nutrición funcional.
- Proteínas vegetales texturizadas (soja, micoproteína, gluten) para aplicaciones en gastronomía vegana y salud deportiva.
- Matrices cárnicas y marinas (pastas de pollo, pescado, ternera cocida) enfocadas a restauración geriátrica, hospitalaria o gourmet.

- Formulaciones híbridas, combinando grasas estructuradas, emulsiones y agentes gelificantes para crear texturas complejas y perfiles nutricionales personalizados.

Estos desarrollos deberán acompañarse de caracterización reológica avanzada, análisis de estabilidad posimpresión y evaluación de compatibilidad térmica.

6.3.2. Implementación de Técnicas Postimpresión Avanzadas

Otro de los aspectos limitantes del presente trabajo reside en la escasa exploración de técnicas de postimpresión, una fase crítica para asegurar la estabilidad estructural, la textura final y la inocuidad del producto impreso. La única técnica evaluada ha sido el enfriamiento rápido mediante nitrógeno líquido, cuya aplicación ha demostrado ser eficaz en la estabilización de estructuras impresas con chocolate blanco, permitiendo además la impresión multicapa a temperaturas controladas. No obstante, la dependencia de este único método restringe el análisis comparativo de otras estrategias de postprocesado, como el enfriamiento gradual, la deshidratación controlada o tratamientos térmicos localizados, que podrían ser más apropiadas o sostenibles según la naturaleza de la matriz alimentaria utilizada.

En el caso de formulaciones con contenido proteico o gelificado, la aplicación de calor mediante hornos de convección, resistencias o placas calientes puede ser necesaria para activar procesos de coagulación, fusión o gelificación térmica [134]. Este tipo de tratamientos térmicos también es crítico en aplicaciones donde el alimento requiere manipulación posterior, empaquetado o consumo inmediato.

Además, no se ha explorado el uso de tecnologías emergentes de postprocesado como el microondas localizado, el calentamiento por radiofrecuencia o el tratamiento por ultrasonidos, que están siendo investigadas actualmente para su integración en impresoras 3D de nueva generación.

Finalmente, la falta de procesos de esterilización o higienización postimpresión supone una barrera para aplicaciones en entornos de alta exigencia sanitaria, como hospitales, geriátricos o alimentación infantil. Aunque se han respetado en todo momento las buenas prácticas de manipulación alimentaria, la validación de ciclos térmicos o tratamientos de descontaminación no ha sido posible en este trabajo.

Dado el papel crítico del postprocesado para asegurar integridad estructural y aceptabilidad sensorial, se recomienda:

- Evaluar procesos de secado por infrarrojos, deshidratación al vacío y horneado controlado, especialmente para matrices vegetales o acuosas.
- Integrar tecnologías emergentes como microondas localizados, calentamiento por inducción o curado por ultrasonidos, que podrían aplicarse capa a capa durante la impresión.
- Estudiar protocolos de esterilización térmica o UV para productos destinados a colectivos vulnerables (sanidad, educación, geriatría).

Estas técnicas permitirán expandir el abanico de alimentos compatibles, aumentar la vida útil y cumplir requisitos sanitarios más exigentes.

6.3.3. Ausencia de Valoración Sensorial Sistemática

Dado que el foco del trabajo ha sido técnico y económico, no se ha llevado a cabo un análisis estructurado de aceptación sensorial por parte de consumidores finales o chefs profesionales. Aunque se han identificado riesgos de rechazo en el análisis estratégico, estos no han sido testeados empíricamente mediante paneles sensoriales, encuestas de percepción o tests triangulares. Este aspecto limita la capacidad de prever con precisión la respuesta del mercado ante productos impresos más innovadores.

Para garantizar la viabilidad comercial del producto final, se propone diseñar y ejecutar:

- Paneles sensoriales con consumidores reales y chefs profesionales, evaluando textura, sabor, apariencia y aceptación global.
- Test A/B con versiones impresas y no impresas de un mismo alimento, para medir el valor percibido y la disposición a pagar.
- Estudios de percepción de tecnología alimentaria aplicada al consumidor español, con enfoque en seguridad, naturalidad e innovación.

Esto permitiría reducir el riesgo de rechazo sensorial o cultural, especialmente relevante en un mercado conservador como el español.

6.4. Proyecciones Estratégicas y Escenarios de Aplicación

Tras validar la viabilidad técnica, funcional y económica de la impresión 3D de alimentos mediante ensayos experimentales y simulaciones financieras, es posible plantear escenarios realistas de implementación en el mercado español, tanto en el corto como en el medio plazo. Estas proyecciones no constituyen ejercicios teóricos, sino modelos de aplicación fundamentados en las capacidades del sistema desarrollado, las tendencias del sector alimentario y las dinámicas del ecosistema nacional de innovación.

El presente apartado propone una visión estructurada de tres rutas estratégicas complementarias:

1. Un acceso inicial a través del sector pastelero gourmet, como vía táctica de entrada al mercado con bajo riesgo sensorial y alta percepción de valor.
2. Una fase de escalabilidad operativa mediante granjas de impresoras, orientada a producción distribuida y reducción de costes unitarios.
3. Una proyección transformadora hacia la nutrición personalizada, alineada con objetivos de salud pública, inclusión y sostenibilidad alimentaria.

Cada uno de estos escenarios está construido sobre hipótesis técnicas y de mercado contrastadas, y permite visualizar el potencial de esta tecnología más allá de su etapa experimental, hacia modelos de negocio viables, escalables y socialmente relevantes.

6.4.1. Restauración Creativa y Alta Gastronomía

Uno de los escenarios más naturales para introducir la impresión 3D de alimentos en el mercado español es la alta gastronomía y restauración creativa, donde el valor no se limita

al sabor o la nutrición, sino que se extiende al componente artístico, la capacidad de sorprender y la experiencia multisensorial. La tecnología desarrollada permite generar formas imposibles, geometrías complejas y estructuras reproducibles con precisión, cualidades especialmente apreciadas en cocina de autor.

Este entorno, caracterizado por precios elevados, márgenes generosos y búsqueda constante de innovación, ofrece condiciones ideales para obtener un retorno de inversión (ROI) favorable y una rápida recuperación de la inversión (payback), incluso sin economías de escala. En este contexto, la impresión 3D no sustituye técnicas tradicionales, sino que actúa como herramienta de diferenciación y creatividad, alineándose con las expectativas de chefs, comensales y medios gastronómicos.

Dentro de este ecosistema gourmet, a la luz de las variables analizadas en el Capítulo 5, la pastelería y la elaboración de postres se perfilan como uno de los segmentos más idóneos para introducir la impresión 3D de alimentos en el mercado español de forma progresiva. Este sector combina varios factores favorables: una demanda creciente de personalización y creatividad, una mayor apertura a la experimentación estética y sensorial, y la disposición de los consumidores a pagar un precio premium por productos exclusivos, innovadores o “de autor”.

Así, destacan casos como Maison Bécam en Francia, que utiliza la impresora 3D Patiss3 para automatizar la producción de bases de pasteles creativos [135]. Según informa *The Times*, la introducción de esta tecnología ha permitido automatizar la elaboración de bases de tartas con diseños geométricos complejos, un proceso que tradicionalmente requería una alta especialización artesanal y numerosas horas de trabajo manual.

La experiencia positiva de este referente internacional demuestra la viabilidad técnica y comercial del modelo, aportando argumentos sólidos para su replicabilidad en el contexto español. La entrada por el segmento de los postres y la pastelería no solo permite minimizar riesgos y barreras culturales, sino que puede servir como plataforma de visibilización, educación y legitimación de la tecnología ante el consumidor español, facilitando su adopción posterior en otros segmentos de la industria alimentaria.

6.4.2. Producción Semiindustrial con Granjas de Impresoras 3D

Tras la validación técnica en entornos gastronómicos de alta personalización, el siguiente paso estratégico hacia la implantación comercial de la impresión 3D de alimentos consiste en su escalado operativo mediante granjas de impresoras, un modelo basado en la coordinación simultánea de múltiples unidades de impresión controladas digitalmente (véase Figura 46).

Esta configuración, ampliamente adoptada en la industria manufacturera y dental [133], permite aumentar significativamente la capacidad de producción manteniendo la flexibilidad y la personalización como elementos diferenciales. En el ámbito alimentario, las granjas de impresión ofrecen una solución eficiente para producciones de volumen medio, con claras ventajas en optimización de recursos, reducción de costes unitarios y escalabilidad por demanda.

Este modelo resulta especialmente adecuado para:

- Catering de eventos y hoteles, donde se combinan volúmenes elevados con requerimientos de presentación individualizada.
- Dark kitchens o cocinas satélite, que operan bajo demanda en entornos urbanos, con foco en eficiencia y diferenciación del producto.
- Servicios de ecommerce de repostería personalizada, con entregas refrigeradas o congeladas que mantienen la integridad estructural de las piezas.
- Centros de innovación gastronómica, como escuelas de cocina, laboratorios culinarios o incubadoras tecnológicas, donde se exploran nuevos formatos, recetas y procesos.

En conjunto, las granjas de impresoras representan una solución intermedia entre la producción artesanal y la industrial, con potencial para responder a nichos de mercado crecientes que exigen alta creatividad, personalización y eficiencia operativa.



Figura 46. Granja de Impresoras [136].

6.4.3. Nutrición Personalizada y Aplicaciones Clínicas

A medio y largo plazo, uno de los escenarios de mayor impacto transformador para la impresión 3D de alimentos es su aplicación en el ámbito de la nutrición personalizada con fines clínicos, geriátricos o escolares. Este modelo se enmarca en una tendencia global hacia la individualización de la dieta, impulsada por los avances en biotecnología, genómica nutricional y tecnologías de fabricación digital [44].

La impresión 3D ofrece una oportunidad sin precedentes para adaptar la forma, textura, composición y densidad nutricional de los alimentos a las necesidades específicas de cada individuo o colectivo, permitiendo una personalización masiva eficiente, segura y estandarizada.

Esta capacidad resulta especialmente útil en:

- Pacientes con disfagia, que requieren texturas modificadas que sean seguras para la deglución sin comprometer el atractivo visual [65].
- Mayores con déficits nutricionales, que necesitan concentraciones proteicas o calóricas específicas, con presentación atractiva y de fácil masticación.
- Poblaciones escolares o con alergias alimentarias, donde la personalización puede mejorar tanto la aceptación como la seguridad alimentaria.

A pesar de su potencial, este escenario enfrenta aún importantes desafíos regulatorios, logísticos y de aceptación cultural. Será necesario avanzar en la normalización de ingredientes imprimibles, la certificación sanitaria de procesos y la demostración de beneficios clínicos mediante estudios de intervención.

Sin embargo, el alineamiento de esta tecnología con los objetivos de envejecimiento saludable, sostenibilidad alimentaria y eficiencia sanitaria la posiciona como una ruta estratégica de alto impacto social y económico a medio plazo.

6.4.4. Síntesis Estratégica y Rutas de Escalado

La secuencia estratégica recomendada para maximizar el impacto y minimizar el riesgo operacional se estructura en tres fases complementarias (véase Figura 47).

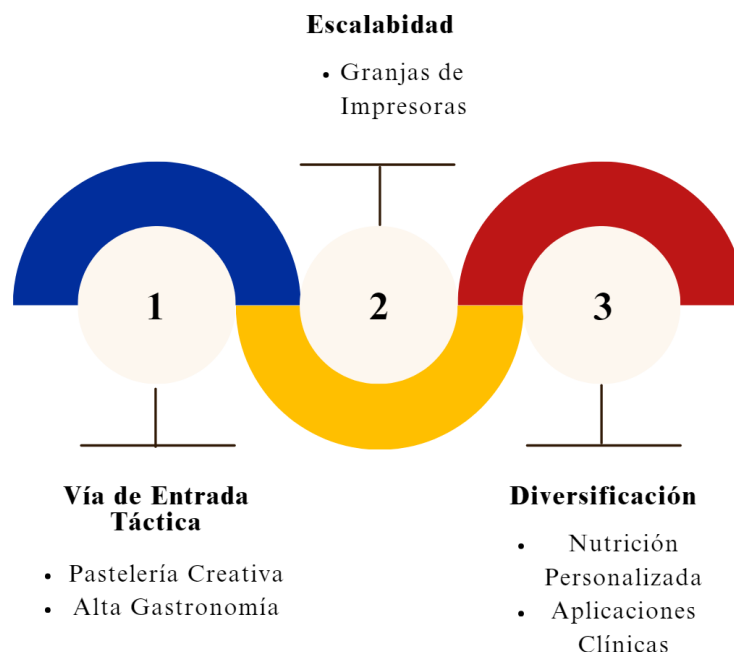


Figura 47. Síntesis de la Estrategia de Escalado de la I3D de Alimentos en España.

La impresión 3D de alimentos se perfila así no solo como una herramienta de diferenciación creativa, sino como una plataforma transversal, capaz de transformar la personalización, la sostenibilidad y la eficiencia en la producción alimentaria bajo un modelo replicable y de alto valor añadido.

6.5. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Para finalizar este Trabajo de Fin de Grado, resulta esencial reflejar la alineación entre la impresión 3D de alimentos y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en el año 2015 como parte de la Agenda 2030. La impresión 3D de alimentos presenta un potencial transformador para contribuir al logro de varios ODS, especialmente aquellos relacionados con la seguridad alimentaria, la salud pública, la innovación industrial, el consumo responsable y la acción climática. A continuación, se detallan los ODS a los que esta tecnología puede aportar de forma directa:

6.5.1. ODS 2 – Hambre Cero

La impresión 3D permite desarrollar alimentos personalizados y densamente nutritivos a partir de materias primas no convencionales o subutilizadas, como proteínas vegetales, insectos o subproductos agroalimentarios [1]. Esta capacidad resulta clave para combatir la malnutrición y diseñar soluciones adaptadas a contextos de vulnerabilidad alimentaria, especialmente en dietas específicas por edad, estado de salud o acceso limitado a alimentos frescos.

6.5.2. ODS 3 – Salud y Bienestar

La tecnología permite adaptar con precisión la textura, el contenido nutricional y la porción de los alimentos, lo cual es fundamental para pacientes con necesidades dietéticas especiales, como personas con disfagia, diabetes o intolerancias alimentarias. Además, la impresión 3D puede facilitar la adherencia a pautas nutricionales individualizadas y mejorar la experiencia del paciente en entornos hospitalarios y geriátricos.

6.5.3. ODS 9 – Industria, Innovación e Infraestructura

La impresión 3D de alimentos representa una forma disruptiva de transformación digital en la industria alimentaria, con potencial para generar nuevas cadenas de valor, productos innovadores y modelos de negocio basados en la personalización y la producción descentralizada [137]. Las granjas de impresoras 3D y los sistemas de fabricación flexible abren el camino a una industria alimentaria más ágil, escalable y sostenible.

6.5.4. ODS 12 – Producción y Consumo Responsables

Al utilizar ingredientes de forma precisa y bajo demanda, la impresión 3D reduce significativamente el desperdicio alimentario durante la producción [138]. Además, posibilita la valorización de excedentes agrícolas, residuos funcionales y productos de bajo valor comercial mediante su incorporación en nuevas formulaciones imprimibles, contribuyendo a una economía circular en el sector agroalimentario.

6.5.5. ODS 13 – Acción por el Clima

El uso de ingredientes de bajo impacto ambiental, como proteínas vegetales o cultivadas, junto con el diseño de cadenas logísticas más cortas y personalizadas, puede reducir la huella de carbono asociada a la producción y distribución de alimentos. La impresión 3D, al fomentar producciones locales y adaptadas, contribuye a mitigar los efectos del cambio climático derivados del transporte y del uso intensivo de recursos.

Referencias

- [1] F. C. Godoi, S. Prakash, y B. R. Bhandari, «3d printing technologies applied for food design: Status and prospects», *J. Food Eng.*, vol. 179, pp. 44-54, jun. 2016, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025.
- [2] M. G. Dancausa Millán y M. G. Millán Vázquez De La Torre, «3D food printing: Technological advances, personalization and future challenges in the food industry», *Int. J. Gastron. Food Sci.*, vol. 37, p. 100963, sep. 2024, doi: 10.1016/j.ijgfs.2024.100963.
- [3] S. Attarin y M. Attaran, «Food Printing: Evolving Technologies, Challenges, Opportunities, and Best adoption Strategies», *J. Int. Technol. Inf. Manag.*, vol. 29, n.º 1, pp. 25-55, ene. 2020, doi: 10.58729/1941-6679.1442.
- [4] Media Relations Team, «Researchers Create 3D Printed Food For People With Swallowing Difficulties», UWE Bristol. Accedido: 11 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.uwe.ac.uk/news/dysphagia-study>
- [5] «FELIX Food 1.6 - Switch Head 3D Printer», FELIX Food. [En línea]. Disponible en: <https://felixfood.nl/felix-food-1-6-switch-head>
- [6] «Solid Edge - A complete product development portfolio», SIEMENS. [En línea]. Disponible en: <https://solidedge.siemens.com/en/>
- [7] «SIMPLIFY3D», SIMPLIFY3D. [En línea]. Disponible en: <https://www.simplify3d.com/>
- [8] Asociación Española de Normalización, «UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017 – Fabricación aditiva. Principios generales. Terminología», UNE (AENOR), Madrid, UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017, 2017.
- [9] «“Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing”, 2nd Edition: By Ian Gibson (Deakin University, Australia), David Rosen (Georgia Institute of Technology, USA) and Brent Stucker (University of Louisville, USA), Springer Science+Business Media, New York, USA, 2015, 498 pages, ISBN: 978-1-4939-2112-6, £81.00, €96.29, US\$119.00», *Johns. Matthey Technol. Rev.*, vol. 59, n.º 3, pp. 193-198, abr. 2015, doi: 10.1595/205651315X688406.
- [10] Dassault Systemes, «Introducción a la fotopolimerización - VAT, SLA, DLP, CDLP». [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/photopolymerization>
- [11] Asociación Española de Normalización, «UNE-EN ISO 17296-2:2017 – Fabricación aditiva. Principios generales. Parte 2: Visión general de categorías de procesos y materias primas», UNE (AENOR), Madrid, UNE-EN ISO 17296-2:2017, 2017.
- [12] Dassault Systemes, «Introducción a la extrusión de materiales - FDM». [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/material-extrusion>

-
- [13] S. Zhu, M. A. Stieger, A. J. Van Der Goot, y M. A. I. Schutyser, «Extrusion-based 3D printing of food pastes: Correlating rheological properties with printing behaviour», *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 58, p. 102214, dic. 2019, doi: 10.1016/j.ifset.2019.102214.
- [14] Z. Liu, B. Bhandari, S. Prakash, S. Mantihal, y M. Zhang, «Linking rheology and printability of a multicomponent gel system of carrageenan-xanthan-starch in extrusion based additive manufacturing», *Food Hydrocoll.*, vol. 87, pp. 413-424, feb. 2019, doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.08.026.
- [15] A. Derossi *et al.*, «Personalized, digitally designed 3D printed food towards the reshaping of food manufacturing and consumption», *Npj Sci. Food*, vol. 8, n.º 1, p. 54, ago. 2024, doi: 10.1038/s41538-024-00296-5.
- [16] R.-A. Varvara, K. Szabo, y D. C. Vodnar, «3D Food Printing: Principles of Obtaining Digitally-Designed Nourishment», *Nutrients*, vol. 13, n.º 10, p. 3617, oct. 2021, doi: 10.3390/nu13103617.
- [17] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, y D. Hui, «Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges», *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, pp. 172-196, jun. 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [18] Dassault Systemes, «Fusión del lecho de polvo». [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/powder-bed-fusion>
- [19] S. Ford y M. Despeisse, «Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges», *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1573-1587, nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150.
- [20] Dassault Systemes, «Binder Jetting». [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/make/guide/process/binder-jetting>
- [21] M. Žujović, R. Obradović, I. Rakonjac, y J. Milošević, «3D Printing Technologies in Architectural Design and Construction: A Systematic Literature Review», *Buildings*, vol. 12, n.º 9, p. 1319, ago. 2022, doi: 10.3390/buildings12091319.
- [22] N. Nachal, J. A. Moses, P. Karthik, y C. Anandharamakrishnan, «Applications of 3D Printing in Food Processing», *Food Eng. Rev.*, vol. 11, n.º 3, pp. 123-141, sep. 2019, doi: 10.1007/s12393-019-09199-8.
- [23] Dassault Systemes, «Material Jetting». [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/make/guide/process/material-jetting>
- [24] «Sheet Lamination (SL) Technology», 3DP LIGHTING. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dprinting.lighting/3d-printing-technologies/sheet-lamination/>
- [25] Institute of Structural Design (ITE), «Additive Manufacturing in Construction (AMC) – The Challenge of Large Scale». [En línea]. Disponible en: <https://magazin.tu-braunschweig.de/en/pi-post/additive-manufacturing-in-construction-amc-the-challenge-of-large-scale/>
-

-
- [26] Marketing, «Tecnología de impresión 3D aplicado en la medicina», KREAR 3D. [En línea]. Disponible en: <https://www.krear3d.com/blog/noticias/tecnologia-de-impresion-3d-aplicado-en-la-medicina/>
- [27] «Impresión 3D de Polvos Metálicos para Aplicaciones Aeroespaciales», TRUER. [En línea]. Disponible en: <https://am-material.com/es/industry-news/3d-printing-metal-powders-for-aerospace-applications/>
- [28] Dassault Systemes, «La impresión 3D en el sector minorista». [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/make/solutions/industries/3d-printing-retail-sector>
- [29] Diamex Joyas, «Impresión de Joyería 3D». [En línea]. Disponible en: <https://joyasdiamex.com/blogs/importante/impresion-de-joyeria-3d>
- [30] Raúl Álvarez, «Cocinar e “imprimir” nuestra comida es la innovación que esperábamos en impresión 3D», XATACA. [En línea]. Disponible en: <https://www.xataka.com/otros-dispositivos/cocinar-e-imprimir-nuestra-comida-es-la-innovacion-que-esperabamos-en-impresion-3d>
- [31] S. Ahmadzadeh, T. Clary, A. Rosales, y A. Ubeyitogullari, «Upcycling imperfect broccoli and carrots into healthy snacks using an innovative 3D food printing approach», *Food Sci. Nutr.*, vol. 12, n.º 1, pp. 84-93, ene. 2024, doi: 10.1002/fsn3.3820.
- [32] H. R. Pirouzian, N. Konar, I. Palabiyik, S. Oba, y O. S. Toker, «Pre-crystallization process in chocolate: Mechanism, importance and novel aspects», *Food Chem.*, vol. 321, p. 126718, ago. 2020, doi: 10.1016/j.foodchem.2020.126718.
- [33] Marta G., «¡Las mejores impresoras 3D de chocolate del mercado!», 3Dnatives. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/las-mejores-impresoras-3d-de-chocolate-para-pascua/#!>
- [34] O. S. Toker, H. R. Pirouzian, I. Palabiyik, y N. Konar, «Chocolate flow behavior: Composition and process effects», *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 63, n.º 19, pp. 3788-3802, jul. 2023, doi: 10.1080/10408398.2021.1993782.
- [35] M. Lanaro *et al.*, «3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation», *J. Food Eng.*, vol. 215, pp. 13-22, dic. 2017, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.06.029.
- [36] P. Lonchamp y R. W. Hartel, «Fat bloom in chocolate and compound coatings», *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, vol. 106, n.º 4, pp. 241-274, abr. 2004, doi: 10.1002/ejlt.200400938.
- [37] Y. Cheng *et al.*, «Rheology of edible food inks from 2D/3D/4D printing, and its role in future 5D/6D printing», *Food Hydrocoll.*, vol. 132, p. 107855, nov. 2022, doi: 10.1016/j.foodhyd.2022.107855.
- [38] Z. Y. Bugday, A. Venkatachalam, P. D. Anderson, y R. G. M. Van Der Sman, «Rheology of paste-like food inks for 3D printing: Effects of nutrient and water content», *Curr. Res. Food Sci.*, vol. 9, p. 100847, 2024, doi: 10.1016/j.crfs.2024.100847.
-

-
- [39] E. İ. Başoğlu, A. B. Özgeçen, y N. Yavuz, «Enhancement of 3D-printability of zucchini puree by rice flour addition», *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 59, n.º 11, pp. 8181-8190, oct. 2024, doi: 10.1111/ijfs.17508.
- [40] Z. Liu, M. Zhang, B. Bhandari, y C. Yang, «Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing», *J. Food Eng.*, vol. 220, pp. 76-82, mar. 2018, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.04.017.
- [41] H. W. Kim *et al.*, «Effect of Hydrocolloids on Rheological Properties and Printability of Vegetable Inks for 3D Food Printing», *J. Food Sci.*, vol. 83, n.º 12, pp. 2923-2932, dic. 2018, doi: 10.1111/1750-3841.14391.
- [42] V. Guénard-Lampron, M. Masson, O. Leichtnam, y D. Blumenthal, «Impact of 3D printing and post-processing parameters on shape, texture and microstructure of carrot appetizer cake», *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 72, p. 102738, ago. 2021, doi: 10.1016/j.ifset.2021.102738.
- [43] A. Derossi, R. Caporizzi, D. Azzollini, y C. Severini, «Application of 3D printing for customized food. A case on the development of a fruit-based snack for children», *J. Food Eng.*, vol. 220, pp. 65-75, mar. 2018, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.05.015.
- [44] A. Abedini *et al.*, «Personalized nutrition with 3D-printed foods: A systematic review on the impact of different additives», *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 328, p. 103181, jun. 2024, doi: 10.1016/j.cis.2024.103181.
- [45] S. Huang *et al.*, «Pectin based gels and their advanced application in food: From hydrogel to emulsion gel», *Food Hydrocoll.*, vol. 160, p. 110841, mar. 2025, doi: 10.1016/j.foodhyd.2024.110841.
- [46] Z. Guo *et al.*, «Application of Protein in Extrusion-Based 3D Food Printing: Current Status and Prospectus», *Foods*, vol. 11, n.º 13, p. 1902, jun. 2022, doi: 10.3390/foods11131902.
- [47] R. Basak y R. Bandyopadhyay, «Formation and Rupture of Ca^{2+} Induced Pectin Biopolymer Gels», 2014, doi: 10.48550/ARXIV.1406.7080.
- [48] Z. Domżańska y E. Jakubczyk, «Characteristics of Food Printing Inks and Their Impact on Selected Product Properties», *Foods*, vol. 14, n.º 3, p. 393, ene. 2025, doi: 10.3390/foods14030393.
- [49] A. Pant *et al.*, «3D food printing of fresh vegetables using food hydrocolloids for dysphagic patients», *Food Hydrocoll.*, vol. 114, p. 106546, may 2021, doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.106546.
- [50] A. Dick, X. Dong, B. Bhandari, y S. Prakash, «The role of hydrocolloids on the 3D printability of meat products», *Food Hydrocoll.*, vol. 119, p. 106879, oct. 2021, doi: 10.1016/j.foodhyd.2021.106879.
- [51] H. Dong, P. Wang, Z. Yang, y X. Xu, «3D printing based on meat materials: Challenges and opportunities», *Curr. Res. Food Sci.*, vol. 6, p. 100423, 2023, doi: 10.1016/j.crfs.2022.100423.
-

-
- [52] P. J. Shand, «Textural, Water Holding, and Sensory Properties of Low-fat Pork Bologna with Normal or Waxy Starch Hull-less Barley», *J. Food Sci.*, vol. 65, n.º 1, pp. 101-107, ene. 2000, doi: 10.1111/j.1365-2621.2000.tb15963.x.
- [53] J. B. Lee *et al.*, «Optimizing 3D Food Printing of Surimi via Regression Analysis: Physical Properties and Additive Formulations», *Foods*, vol. 14, n.º 5, p. 889, mar. 2025, doi: 10.3390/foods14050889.
- [54] H. A. Yatmaz, «3D-Printed Meat Paste Using Minimal Additive: Assessment of Rheological and Printing Behavior with Post-Processing Stability», *Food Biophys.*, vol. 19, n.º 3, pp. 503-516, sep. 2024, doi: 10.1007/s11483-024-09866-2.
- [55] C. Wang, M. Ma, Y. Wei, Y. Zhao, Y. Lei, y J. Zhang, «Effects of CaCl₂ on 3D Printing Quality of Low-Salt Surimi Gel», *Foods*, vol. 12, n.º 11, p. 2152, may 2023, doi: 10.3390/foods12112152.
- [56] A. Dick, B. Bhandari, y S. Prakash, «Post-processing feasibility of composite-layer 3D printed beef», *Meat Sci.*, vol. 153, pp. 9-18, jul. 2019, doi: 10.1016/j.meatsci.2019.02.024.
- [57] «Innovative 3D food printer cuts food waste and boosts creativity in the kitchen», eufic. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.eufic.org/en/newsroom/article/innovative-3d-food-printer-cuts-food-waste-and-boosts-creativity-in-the-kitchen>
- [58] Amelia H., «Meet the Foodini, the Michelin-Star Approved Appliance Bringing 3D Printing to the Kitchen», 3Dnatives. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/en/foodini-michelin-star-am-kitchen-appliance-211220206/?utm>
- [59] «FOOD INK BARCELONA», FOOD INK BARCELONA. [En línea]. Disponible en: <https://foodink.io/>
- [60] «3D Food Printing Facility Targets 1,000 Tonnes of Production in 2024», FOOD ENGINEERING. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.foodengineeringmag.com/articles/101788-3d-food-printing-facility-targets-1-000-tonnes-of-production-in-2024?utm>
- [61] Ben Emminger, «3D-Printed Protein Bars are Now a Thing You Can Buy», GEAR PATROL. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gearpatrol.com/fitness/a40407142/nourished-3d-printed-protein-bars/?utm>
- [62] «3D printed food: the future of personalised nutrition», TNO. [En línea]. Disponible en: <https://www.tno.nl/en/newsroom/insights/2024/09/3d-printed-food-personalised-nutrition/?utm>
- [63] Ada Shaikhmag, «Gastronomy scales up unique 3D printed meals for dysphagia patients», 3D Printing Industry. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://3dprintingindustry.com/news/gastronomy-scales-up-unique-3d-printed-meals-for-dysphagia-patients-239729/>
-

-
- [64] Michael Molitch-Hou, «Gastronomy Launches Industrial Production of 3D Printed Food for Dysphagia Patients», 3D PRINT. [En línea]. Disponible en: <https://3dprint.com/308684/gastronomy-launches-industrial-production-of-3d-printed-food-for-dysphagia-patients/?utm>
- [65] J. Shao, Z. Zheng, J. Hu, N. Sriboonvorakul, y S. Lin, «3D-Printed Foods for Dysphagia: A Bibliometric Review», *Foods*, vol. 14, n.º 12, p. 2058, jun. 2025, doi: 10.3390/foods14122058.
- [66] Z. Liu *et al.*, «3D printing of nutritious dysphagia diet: Status and perspectives», *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 147, p. 104478, may 2024, doi: 10.1016/j.tifs.2024.104478.
- [67] Z. Liu *et al.*, «3D printed dysphagia diet using pea protein gel modified by xanthan gum with different pyruvate group content», *Food Chem. X*, vol. 25, p. 102121, ene. 2025, doi: 10.1016/j.fochx.2024.102121.
- [68] CD Eskilson, «Reducing Waste by Upcycling Misfit Produce», University of Arkansas. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aplus.uark.edu/reducing-waste-by-upcycling-misfit-produce/?utm>
- [69] L. N. Jayakody *et al.*, «Next-generation 3D-printed nutritious food derived from waste plastic and biomass», *Trends Biotechnol.*, vol. 42, n.º 6, pp. 799-800, jun. 2024, doi: 10.1016/j.tibtech.2024.04.004.
- [70] A. Tyupova y J. Harasym, «Valorization of Fruit and Vegetables Industry By-Streams for 3D Printing—A Review», *Foods*, vol. 13, n.º 14, p. 2186, jul. 2024, doi: 10.3390/foods13142186.
- [71] S. You, Q. Huang, y X. Lu, «Development of fat-reduced 3D printed chocolate by substituting cocoa butter with water-in-oil emulsions», *Food Hydrocoll.*, vol. 135, p. 108114, feb. 2023, doi: 10.1016/j.foodhyd.2022.108114.
- [72] D. B. Zarić *et al.*, «Rheological, Thermal, and Textural Characteristics of White, Milk, Dark, and Ruby Chocolate», *Processes*, vol. 12, n.º 12, p. 2810, dic. 2024, doi: 10.3390/pr12122810.
- [73] P. Rando y M. Ramaioli, «Food 3D printing: Effect of heat transfer on print stability of chocolate», *J. Food Eng.*, vol. 294, p. 110415, abr. 2021, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110415.
- [74] M. R. Ramos Ramos, V. A. García Londoño, V. Borroni, R. J. Candal, y M. L. Herrera, «Crystallization and polymorphic behaviors of cocoa butter alternatives: A review», *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 100, n.º 10, pp. 759-773, oct. 2023, doi: 10.1002/aocs.12730.
- [75] E. Ostrowska-Ligeza *et al.*, «Characterization of Thermal Properties of Ruby Chocolate Using DSC, PDSC and TGA Methods», *Appl. Sci.*, vol. 13, n.º 9, p. 5221, abr. 2023, doi: 10.3390/app13095221.
-

-
- [76] N. Konar, I. Palabiyik, A. Karimidastjerd, y O. Said Toker, «Chocolate microstructure: A comprehensive review», *Food Res. Int.*, vol. 196, p. 115091, nov. 2024, doi: 10.1016/j.foodres.2024.115091.
- [77] E. O. Afoakwa, A. Paterson, y M. Fowler, «Effects of particle size distribution and composition on rheological properties of dark chocolate», *Eur. Food Res. Technol.*, vol. 226, n.º 6, pp. 1259-1268, abr. 2008, doi: 10.1007/s00217-007-0652-6.
- [78] S. Mantihal, S. Prakash, F. C. Godoi, y B. Bhandari, «Effect of additives on thermal, rheological and tribological properties of 3D printed dark chocolate», *Food Res. Int.*, vol. 119, pp. 161-169, may 2019, doi: 10.1016/j.foodres.2019.01.056.
- [79] F. Pesce, L. Parafati, B. Fallico, y R. Palmeri, «Use of Liquid Nitrogen in Food Products: A Review», *Food Front.*, p. fff2.70035, may 2025, doi: 10.1002/fff2.70035.
- [80] C. Nicolle *et al.*, «Effect of carrot intake on cholesterol metabolism and on antioxidant status in cholesterol-fed rat», *Eur. J. Nutr.*, vol. 42, n.º 5, pp. 254-261, oct. 2003, doi: 10.1007/s00394-003-0419-1.
- [81] R. Begum, M. A. F. Chowdhury, M. R. Hasan, M. F. Rahman, M. H. Rahman, y M. A. Alim, «Efficacy of freeze-dried carrot pomace powder in improving the quality of wheat bread», *Food Res.*, vol. 7, n.º 6, pp. 11-22, nov. 2023, doi: 10.26656/fr.2017.7(6).102.
- [82] M. Sharma, E. Kristo, M. Corredig, y L. Duizer, «Effect of hydrocolloid type on texture of pureed carrots: Rheological and sensory measures», *Food Hydrocoll.*, vol. 63, pp. 478-487, feb. 2017, doi: 10.1016/j.foodhyd.2016.09.040.
- [83] O. Livny *et al.*, «Carotene bioavailability from differently processed carrot meals in human ileostomy volunteers», *Eur. J. Nutr.*, vol. 42, n.º 6, pp. 338-345, dic. 2003, doi: 10.1007/s00394-003-0430-6.
- [84] C. Deng, O. Melnyk, T. Marenkova, y Y. Luo, «Modification in Physicochemical, Structural and Digestive Properties of Potato Starch During Heat-Moisture Treatment Combined with Microwave Pre- and Post-Treatment», *Pol. J. Food Nutr. Sci.*, vol. 72, n.º 3, pp. 249-261, sep. 2022, doi: 10.31883/pjfn/151566.
- [85] P. J. Whitcomb y C. W. Macosko, «Rheology of Xanthan Gum», *J. Rheol.*, vol. 22, n.º 5, pp. 493-505, oct. 1978, doi: 10.1122/1.549485.
- [86] J. Sun, Z. Peng, W. Zhou, J. Y. H. Fuh, G. S. Hong, y A. Chiu, «A Review on 3D Printing for Customized Food Fabrication», *Procedia Manuf.*, vol. 1, pp. 308-319, 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.09.057.
- [87] I. Dankar, M. Pujolà, F. El Omar, F. Sepulcre, y A. Haddarah, «Impact of Mechanical and Microstructural Properties of Potato Puree-Food Additive Complexes on Extrusion-Based 3D Printing», *Food Bioprocess Technol.*, vol. 11, n.º 11, pp. 2021-2031, nov. 2018, doi: 10.1007/s11947-018-2159-5.
- [88] Z. Liu, M. Zhang, y B. Bhandari, «Effect of gums on the rheological, microstructural and extrusion printing characteristics of mashed potatoes», *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 117, pp. 1179-1187, oct. 2018, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.06.048.
-

-
- [89] L. Feng *et al.*, «Effect of particle size distribution on the carotenoids release, physicochemical properties and 3D printing characteristics of carrot pulp», *LWT*, vol. 139, p. 110576, mar. 2021, doi: 10.1016/j.lwt.2020.110576.
- [90] El Corte Ingles, «Deshidratadora WMF Kitchenminis Snack to go». [En línea]. Disponible en: https://www.elcorteingles.es/electrodomesticos/MP_0019109_4211129131018-deshidratadora-wmf-kitchenminis-snack-to-go/
- [91] R. U. Syed *et al.*, «Broccoli: A Multi-Faceted Vegetable for Health: An In-Depth Review of Its Nutritional Attributes, Antimicrobial Abilities, and Anti-inflammatory Properties», *Antibiotics*, vol. 12, n.º 7, p. 1157, jul. 2023, doi: 10.3390/antibiotics12071157.
- [92] M. Liu, L. Zhang, S. Ser, J. Cumming, y K.-M. Ku, «Comparative Phytonutrient Analysis of Broccoli By-Products: The Potentials for Broccoli By-Product Utilization», *Molecules*, vol. 23, n.º 4, p. 900, abr. 2018, doi: 10.3390/molecules23040900.
- [93] A. T. Dinkova-Kostova y R. V. Kostov, «Glucosinolates and isothiocyanates in health and disease», *Trends Mol. Med.*, vol. 18, n.º 6, pp. 337-347, jun. 2012, doi: 10.1016/j.molmed.2012.04.003.
- [94] Shubha, Dr Reetu, S. Anand, y Anirban Mukherjee, «Broccoli a potential functional food», 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.19222.57927.
- [95] T. Vukušić Pavičić, T. Grgić, M. Ivanov, D. Novotni, y Z. Herceg, «Influence of Flour and Fat Type on Dough Rheology and Technological Characteristics of 3D-Printed Cookies», *Foods*, vol. 10, n.º 1, p. 193, ene. 2021, doi: 10.3390/foods10010193.
- [96] Y. Pan *et al.*, «Investigation on 3D Printing of Shrimp Surimi Adding Three Edible Oils», *Foods*, vol. 13, n.º 3, p. 429, ene. 2024, doi: 10.3390/foods13030429.
- [97] S. L. Voon, J. An, G. Wong, Y. Zhang, y C. K. Chua, «3D food printing: a categorised review of inks and their development», *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 14, n.º 3, pp. 203-218, jul. 2019, doi: 10.1080/17452759.2019.1603508.
- [98] R. Verkerk y M. Dekker, «Glucosinolates and Myrosinase Activity in Red Cabbage (*Brassica oleracea* L. Var. *Capitata* f. *rubra* DC.) after Various Microwave Treatments», *J. Agric. Food Chem.*, vol. 52, n.º 24, pp. 7318-7323, dic. 2004, doi: 10.1021/jf0493268.
- [99] M. E. Cartea y P. Velasco, «Glucosinolates in Brassica foods: bioavailability in food and significance for human health», *Phytochem. Rev.*, vol. 7, n.º 2, pp. 213-229, jul. 2008, doi: 10.1007/s11101-007-9072-2.
- [100] W. Wu, J. Chen, D. Yu, S. Chen, X. Ye, y Z. Zhang, «Analysis of Processing Effects on Glucosinolate Profiles in Red Cabbage by LC-MS/MS in Multiple Reaction Monitoring Mode», *Molecules*, vol. 26, n.º 17, p. 5171, ago. 2021, doi: 10.3390/molecules26175171.
-

-
- [101] Z. Gong, M. Zhang, B. Bhandari, A. S. Mujumdar, y S. Jin-Cai, «Rheological Properties of Cabbage Pulp», *Int. J. Food Prop.*, vol. 13, n.º 5, pp. 1066-1073, ago. 2010, doi: 10.1080/10942910902954551.
- [102] R. Efendi, R. I. Pradana, L. K. Dewi, y C. Cahyani, «The Effect of Drying on Anthocyanin Content and Antioxidant Activity in Red Cabbage and White Cabbage», *Reaktor*, vol. 22, n.º 3, pp. 86-91, ene. 2023, doi: 10.14710/reaktor.22.3.86-91.
- [103] D. Dhingra, M. Michael, H. Rajput, y R. T. Patil, «Dietary fibre in foods: a review», *J. Food Sci. Technol.*, vol. 49, n.º 3, pp. 255-266, jun. 2012, doi: 10.1007/s13197-011-0365-5.
- [104] W. Lian *et al.*, «Impact of Insoluble Dietary Fiber and CaCl₂ on Structural Properties of Soybean Protein Isolate–Wheat Gluten Composite Gel», *Foods*, vol. 12, n.º 9, p. 1890, may 2023, doi: 10.3390/foods12091890.
- [105] S. A. Siddiqui *et al.*, «Impact of drying on techno-functional and nutritional properties of food proteins and carbohydrates - A comprehensive review», *Dry. Technol.*, vol. 42, n.º 4, pp. 592-611, mar. 2024, doi: 10.1080/07373937.2024.2303580.
- [106] «3D Food Printing Market Size, Share & Trends Report 3D Food Printing Market Size, Share & Trends Analysis Report By Component (Hardware, Software), By Technology (Extrusion-based Printing, Binder Printing), By Ingredient (Confectionery, Dough), By End-use, By Region, And Segment Forecasts, 2024 - 2030», Grand View Research. Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-food-printing-market-report>
- [107] Deepa Pandey, «3D Food Printing Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034», Precedence Research, 3439, may 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.precedenceresearch.com/3d-food-printing-market>
- [108] «Deep-Space Food Science Research Improves 3D-Printing Capabilities», NASA Spinoff. [En línea]. Disponible en: https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2019/ip_2.html
- [109] Aniket Hade, «3D Food Printing Market by Offering, Printing Method (Layer-by-layer, Mold-based), Printing Technology (Extrusion, Powder Binding Deposition), Ingredient Form (Pastes and Purees, Powdered Ingredients), End User, and Geography - Global Forecast to 2030», Metinulous Research, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.meticulousresearch.com/product/3d-food-printing-market-4995>
- [110] «Natural Machines». [En línea]. Disponible en: <https://www.naturalmachines.com/>
- [111] San Jones, «‘Our imitation is total’: Spanish tech startup aims to put 3D-printed meat on our plates», *The Guardian*, Pamplona, 11 de febrero de 2024. Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.theguardian.com/world/2024/feb/11/spanish-startup-cocuous-pamplona-quest-3d-printed-meat-steak>
- [112] N. Nopparat y D. Motte, «Business model patterns in the 3D food printing industry», *Int. J. Innov. Sci.*, vol. 16, n.º 1, pp. 77-94, ene. 2024, doi: 10.1108/IJIS-09-2022-0176.
-

-
- [113] Deloitte España, «Principales retos y tendencias en el sector de alimentación y bebidas», 27, jun. 2024. Accedido: 18 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.deloitte.com/es/es/Industries/consumer/perspectives/tendencias-alimentacion-y-bebidas.html?utm_source
- [114] C. Talens, Y. Rios, y E. Santa Cruz, «Leveraging innovative technologies for designing a healthy and personalized breakfast: consumer perception of three smart cooking devices in the EU», *Open Res. Eur.*, vol. 1, p. 151, may 2022, doi: 10.12688/openreseurope.14234.3.
- [115] F. Silva, T. Pereira, S. Mendes, L. Gordo, y M. M. M. Gil, «Consumer's Perceptions and Motivations on the Consumption of Fortified Foods and 3d Food Printing», 2024, *SSRN*. doi: 10.2139/ssrn.4848380.
- [116] M. M. Ross, A. M. Collins, M. B. McCarthy, y A. L. Kelly, «Overcoming barriers to consumer acceptance of 3D-printed foods in the food service sector», *Food Qual. Prefer.*, vol. 100, p. 104615, sep. 2022, doi: 10.1016/j.foodqual.2022.104615.
- [117] G. Califano y C. Spence, «Consumer preference and willingness to pay for 3D-printed chocolates: A discrete choice experiment», *Future Foods*, vol. 9, p. 100378, jun. 2024, doi: 10.1016/j.fufo.2024.100378.
- [118] R. A. I. Alzain, «Large-Scale 3D Printing -- Market Analysis», 2023, *arXiv*. doi: 10.48550/ARXIV.2301.00680.
- [119] Luis Felipe Catilleja, «With 3D printed “steaks”, Spanish startup eyes the mass market», Reuters. Accedido: 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.reuters.com/technology/with-3d-printed-steaks-spanish-startup-eyes-mass-market-2021-06-29/?utm>
- [120] Flora Southey, «NovaMeat develops ‘world’s first’ meat analogue with look and feel of whole beef muscle cut», Food Navigator EUROPE. Accedido: 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.foodnavigator.com/Article/2020/01/07/NovaMeat-develops-meat-analogue-with-look-and-feel-of-whole-beef-muscle-cut/?utm>
- [121] «Protein machine: This 3D printer makes plant-based beef», *The Washington Post*, 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.washingtonpost.com/video/business/protein-machine-this-3d-printer-makes-plant-based-beef/2025/03/06/ed3cd113-f3a8-4c57-85f5-36e705fbelcf_video.html?utm
- [122] Elaine Watson, «Novameat raises \$19.2m to expand next-gen plant-based meat texturizing tech: ‘We have a clear path to profitability’», AFN. Accedido: 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://agfundernews.com/novameat-raises-19-2m-to-expand-next-gen-plant-based-meat-texturizing-tech-we-have-a-clear-path-to-profitability?utm>
- [123] Flora Southey, «Cocuu: Alt meat and fish start-up develops ‘disruptive’ 3D printing tech», Food Navigator EUROPE. Accedido: 19 de junio de 2025. [En línea].
-

Disponible en: <https://www.foodnavigator.com/Article/2021/06/22/Cocuu-Meet-the-start-up-disrupting-fake-meat-with-3D-printing/?utm>

[124] Olivia Chavassieu, «Spain's Cocuu Plans to Produce 1,000 Tonnes of 3D Printed Plant-Based Bacon in 2024», Big Idea Ventures. Accedido: 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://bigideaventures.com/spains-cocuu-plans-to-produce-1000-tonnes-of-3d-printed-plant-based-bacon-in-2024/?utm>

[125] Amelia H., «Meet the Foodini, the Michelin-Star Approved Appliance Bringing 3D Printing to the Kitchen», 3Dnatives. Accedido: 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/en/foodini-michelin-star-am-kitchen-appliance-211220206/?utm>

[126] Elaine Watson, «Foodini 3D printer co-founder: “We’ve taken a food manufacturing facility and shrunk it down to the size of a box that fits on your kitchen counter”», Food Navigator EUROPE. Accedido: 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.foodnavigator-usa.com/Article/2015/10/30/Natural-Machines-co-founder-explains-merits-of-the-Foodini-3D-printer/?utm>

[127] A. N. Hamilton, R. S. Mirmahdi, A. Ubeyitogullari, C. K. Romana, J. I. Baum, y K. E. Gibson, «From bytes to bites: Advancing the food industry with three-dimensional food printing», *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 23, n.º 1, p. e13293, ene. 2024, doi: 10.1111/1541-4337.13293.

[128] Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, *Restauration: qu'est-ce que la mention «fait maison»?* [En línea]. Disponible en: <https://www.economie.gouv.fr/entreprises/fait-maison>

[129] S. González, «“Hecho en casa”: Francia quiere que los restaurantes indiquen en la carta si han elaborado o no sus platos», *El País*, 28 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://elpais.com/gastronomia/2023-10-28/hecho-en-casa-francia-quiere-que-los-restaurantes-indiquen-en-la-carta-si-han-elaborado-o-no-sus-platos.html>

[130] Red Eléctrica Española, «Informe del sistema eléctrico español 2022», mar. 2023.

[131] T. Birtchnell y W. Hoyle, *3D Printing for Development in the Global South*. London: Palgrave Macmillan UK, 2014. doi: 10.1057/9781137365668.

[132] European Union, «Regulation (EC) No 853/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the hygiene of foodstuffs», 32004R0853, abr. 2004.

[133] M. Gebler, A. J. M. Schoot Uiterkamp, y C. Visser, «A global sustainability perspective on 3D printing technologies», *Energy Policy*, vol. 74, pp. 158-167, nov. 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2014.08.033.

[134] M. Mudau y O. A. Adebo, «Three dimensional (3D)-printed foods: A review of recent advances in their ingredients, printing techniques, food printers, post-processing methods, consumer acceptance and safety», *J. Food Process Eng.*, vol. 47, n.º 5, p. e14621, may 2024, doi: 10.1111/jfpe.14621.

[135] «French bakery deploys 3D printer to craft cakes with one click», *The Times*. [En línea]. Disponible en: <https://www.thetimes.com/world/europe/article/french-bakery-3d-cake-printer-b5jp2fhbl>

[136] «¿Qué es un Sistema (MES) o Software de gestión de la producción en fabricación aditiva?», *Innovación y Tecnología*. [En línea]. Disponible en: <https://innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/que-es-un-sistema-mes-o-software-de-gestion-de-la-produccion-en-fabricacion-aditiva/>

[137] S. Mantihal, R. Kobun, y B.-B. Lee, «3D food printing of as the new way of preparing food: A review», *Int. J. Gastron. Food Sci.*, vol. 22, p. 100260, dic. 2020, doi: 10.1016/j.ijgfs.2020.100260.

[138] G. Hooi Chuan Wong *et al.*, «3D food printing– sustainability through food waste upcycling», *Mater. Today Proc.*, vol. 70, pp. 627-630, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.08.565.

Anexo A. Parámetros Técnicos de Impresión

A.1. Parámetros de Chocolate Negro

Extrusor	
Parámetro	Valor
Diámetro de la boquilla	1,60 mm
Multiplicador de extrusión	2
Ancho de extrusión	1,60 mm
Usar retracciones	[Marcado]
Distancia de retracción	1,00 mm
Distancia adicional de reinicio	0,01 mm
Retraer elevación vertical	0,50 mm
Velocidad de retracción	300,0 mm/min
Corte de flujo	[Marcado]
Distancia de corte de flujo	3,00 mm
Limpiar boquilla	[Marcado]
Distancia de limpieza	3,00 mm

Tabla A. 1. Parámetros del Extrusor para Chocolate Negro.

Capa	
Parámetro	Valor
Altura de la capa	2,0000 mm
Capas sólidas superiores	1
Capas sólidas inferiores	1
Perímetros	2
Altura de la primera capa	100%
Ancho de la primera capa	100%
Velocidad de la primera capa	100%

Tabla A. 2. Parámetros de Capa para Chocolate Negro.

Capas solidas	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno externo	Rectilíneo
Rotación de patrones externos	0 deg
Área de umbral de relleno sólido	25,0 mm ²
Expansión adicional de relleno sólido	0,0 mm

Tabla A. 3. Parámetros de Capas Sólidas para Chocolate Negro.

Temperatura	
Parámetro	Valor
Habilitar el controlador de temperatura	[Marcado]
Temperatura del Extrusor	30 °C

Tabla A. 4. Parámetros de Temperatura para Chocolate Negro.

Relleno	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno interno	Triangular
Rotación de patrones internos	0 deg
Porcentaje de relleno interno	80%
Ancho de relleno	100%
Capas de combinación de relleno	1
Superposición al contorno	15%
Longitud mínima de relleno	3,0 mm
Capas de relleno denso	0
Porcentaje de relleno denso	85%

Tabla A. 5. Parámetros del Relleno para Chocolate Negro.

Relleno de Soporte	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno de soporte	Alineado
Porcentaje de relleno de soporte	75%
Capas de soporte base	1
Distancia de infación adicional	0 mm
Combinar capas del soporte	1 capas
Capas superiores del soporte denso	3
Capas inferiores del soporte denso	3
Porcentaje de relleno del soporte denso	90%
Expansión extra del soporte denso	0,00 mm
Separación horizontal	0,50 mm
Capas de separación verticales	2
Capas de separación verticales inferiores	2

Tabla A.6. Parámetros del Relleno de Soporte para Chocolate Negro.

Velocidades	
Parámetro	Valor
Velocidad de impresión por defecto	720,0 mm/min
Velocidad del perímetro exterior	75%
Velocidad del perímetro interior	75%
Velocidad de la capa superior	50%
Velocidad del relleno sólido	100%
Velocidad del soporte escaso	100%
Velocidad de soporte densa	75%
Velocidad de movimiento XY	9000,0 mm/min
Velocidad de movimiento Z	1002,0 mm/min

Tabla A. 7. Parámetros de Velocidad para Chocolate Negro.

A.2. Parámetros de Chocolate Blanco

Extrusor	
Parámetro	Valor
Diámetro de la boquilla	1,00 mm
Multiplicador de extrusión	1
Ancho de extrusión	1,00 mm
Usar retracciones	[Marcado]
Distancia de retracción	1,00 mm
Distancia adicional de reinicio	0,01 mm
Retraer elevación vertical	0,50 mm
Velocidad de retracción	300,0 mm/min
Corte de flujo	[Marcado]
Distancia de corte de flujo	3,00 mm
Limpiar boquilla	[Marcado]
Distancia de limpieza	3,00 mm

Tabla A. 8. Parámetros del Extrusor para Chocolate Blanco.

Capa	
Parámetro	Valor
Altura de la capa	2,0000 mm
Capas sólidas superiores	3
Capas sólidas inferiores	3
Perímetros	2
Altura de la primera capa	100%
Ancho de la primera capa	100%
Velocidad de la primera capa	100%

Tabla A. 9. Parámetros de Capa para Chocolate Blanco.

Capas solidas	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno externo	Rectilíneo
Rotación de patrones externos	0 deg
Área de umbral de relleno sólido	25,0 mm ²
Expansión adicional de relleno sólido	0,0 mm

Tabla A. 10. Parámetros de Capas Sólidas para Chocolate Blanco.

Temperatura	
Parámetro	Valor
Habilitar el controlador de temperatura	[Marcado]
Temperatura del Extrusor	28 °C

Tabla A. 11. Parámetros de Temperatura para Chocolate Blanco.

Relleno	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno interno	Triangular
Rotación de patrones internos	0 deg
Porcentaje de relleno interno	80%
Ancho de relleno	100%
Capas de combinación de relleno	1
Superposición al contorno	15%
Longitud mínima de relleno	3,0 mm
Capas de relleno denso	0
Porcentaje de relleno denso	85%

Tabla A. 12. Parámetros del Relleno para Chocolate Blanco.

Relleno de Soporte	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno de soporte	Alineado
Porcentaje de relleno de soporte	75%
Capas de soporte base	1
Distancia de infación adicional	0 mm
Combinar capas del soporte	1 capas
Capas superiores del soporte denso	3
Capas inferiores del soporte denso	3
Porcentaje de relleno del soporte denso	90%
Expansión extra del soporte denso	0,00 mm
Separación horizontal	0,50 mm
Capas de separación verticales	2
Capas de separación verticales inferiores	2

Tabla A. 13. Parámetros del Relleno de Soporte para Chocolate Blanco.

Velocidades	
Parámetro	Valor
Velocidad de impresión por defecto	720,0 mm/min
Velocidad del perímetro exterior	75%
Velocidad del perímetro interior	75%
Velocidad de la capa superior	50%
Velocidad del relleno sólido	100%
Velocidad del soporte escaso	100%
Velocidad de soporte densa	75%
Velocidad de movimiento XY	9000,0 mm/min
Velocidad de movimiento Z	1002,0 mm/min

Tabla A. 14. Parámetros de Velocidad para Chocolate Blanco.

A.3. Parámetros de Zanahoria Hidrolizada

Extrusor	
Parámetro	Valor
Diámetro de la boquilla	1,00 mm
Multiplicador de extrusión	1
Ancho de extrusión	1,00 mm
Usar retracciones	[Marcado]
Distancia de retracción	1,00 mm
Distancia adicional de reinicio	0,01 mm
Retraer elevación vertical	0,50 mm
Velocidad de retracción	300,0 mm/min
Corte de flujo	[Marcado]
Distancia de corte de flujo	3,00 mm
Limpiar boquilla	[Marcado]
Distancia de limpieza	3,00 mm

Tabla A. 15. Parámetros del Extrusor para Zanahoria Hidrolizada.

Capa	
Parámetro	Valor
Altura de la capa	1,5000 mm
Capas sólidas superiores	3
Capas sólidas inferiores	3
Perímetros	2
Altura de la primera capa	100%
Ancho de la primera capa	100%
Velocidad de la primera capa	100%

Tabla A. 16. Parámetros de Capa para Zanahoria Hidrolizada.

Capas solidas	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno externo	Rectilíneo
Rotación de patrones externos	0 deg
Área de umbral de relleno sólido	25,0 mm ²
Expansión adicional de relleno sólido	0,0 mm

Tabla A. 17. Parámetros de Capas Sólidas para Zanahoria Hidrolizada.

Temperatura	
Parámetro	Valor
Habilitar el controlador de temperatura	[Marcado]
Temperatura del Extrusor	35 °C

Tabla A. 18. Parámetros de Temperatura para Zanahoria Hidrolizada.

Relleno	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno interno	Triangular
Rotación de patrones internos	0 deg
Porcentaje de relleno interno	30%
Ancho de relleno	100%
Capas de combinación de relleno	1
Superposición al contorno	15%
Longitud mínima de relleno	3,0 mm
Capas de relleno denso	0
Porcentaje de relleno denso	75%

Tabla A. 19. Parámetros del Relleno para Zanahoria Hidrolizada.

Relleno de Soporte	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno de soporte	Alineado
Porcentaje de relleno de soporte	30%
Capas de soporte base	1
Distancia de infación adicional	0 mm
Combinar capas del soporte	1 capas
Capas superiores del soporte denso	3
Capas inferiores del soporte denso	3
Porcentaje de relleno del soporte denso	75%
Expansión extra del soporte denso	0,00 mm
Separación horizontal	0,50 mm
Capas de separación verticales	2
Capas de separación verticales inferiores	2

Tabla A. 20. Parámetros del Relleno de Soporte para Zanahoria Hidrolizada.

Velocidades	
Parámetro	Valor
Velocidad de impresión por defecto	540,0 mm/min
Velocidad del perímetro exterior	100%
Velocidad del perímetro interior	100%
Velocidad de la capa superior	100%
Velocidad del relleno sólido	100%
Velocidad del soporte escaso	100%
Velocidad de soporte densa	100%
Velocidad de movimiento XY	9000,0 mm/min
Velocidad de movimiento Z	1002,0 mm/min

Tabla A. 21. Parámetros de Velocidad para Zanahoria Hidrolizada.

A.4. Parámetros de Zanahoria Deshidratada

Extrusor	
Parámetro	Valor
Diámetro de la boquilla	1,50 mm
Multiplicador de extrusión	3
Ancho de extrusión	1,50 mm
Usar retracciones	[Marcado]
Distancia de retracción	3,00 mm
Distancia adicional de reinicio	0,01 mm
Retraer elevación vertical	0,50 mm
Velocidad de retracción	300,0 mm/min
Corte de flujo	[Marcado]
Distancia de corte de flujo	3,00 mm
Limpiar boquilla	[Marcado]
Distancia de limpieza	3,00 mm

Tabla A. 22. Parámetros del Extrusor para Zanahoria Deshidratada.

Capa	
Parámetro	Valor
Altura de la capa	2,0000 mm
Capas sólidas superiores	3
Capas sólidas inferiores	3
Perímetros	2
Altura de la primera capa	100%
Ancho de la primera capa	100%
Velocidad de la primera capa	100%

Tabla A. 23. Parámetros de Capa para Zanahoria Deshidratada.

Capas solidas	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno externo	Rectilíneo
Rotación de patrones externos	0 deg
Área de umbral de relleno sólido	25,0 mm ²
Expansión adicional de relleno sólido	0,0 mm

Tabla A. 24. Parámetros de Capas Sólidas para Zanahoria Deshidratada.

Temperatura	
Parámetro	Valor
Habilitar el controlador de temperatura	[Marcado]
Temperatura del Extrusor	50 °C

Tabla A. 25. Parámetros de Temperatura para Zanahoria Deshidratada.

Relleno	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno interno	Triangular
Rotación de patrones internos	0 deg
Porcentaje de relleno interno	30%
Ancho de relleno	100%
Capas de combinación de relleno	1
Superposición al contorno	15%
Longitud mínima de relleno	3,0 mm
Capas de relleno denso	0
Porcentaje de relleno denso	75%

Tabla A. 26. Parámetros del Relleno para Zanahoria Deshidratada.

Relleno de Soporte	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno de soporte	Alineado
Porcentaje de relleno de soporte	30%
Capas de soporte base	1
Distancia de infación adicional	0 mm
Combinar capas del soporte	1 capas
Capas superiores del soporte denso	3
Capas inferiores del soporte denso	3
Porcentaje de relleno del soporte denso	75%
Expansión extra del soporte denso	0,00 mm
Separación horizontal	0,50 mm
Capas de separación verticales	2
Capas de separación verticales inferiores	2

Tabla A. 27. Parámetros del Relleno de Soporte para Zanahoria Deshidratada.

Velocidades	
Parámetro	Valor
Velocidad de impresión por defecto	300,0 mm/min
Velocidad del perímetro exterior	100%
Velocidad del perímetro interior	100%
Velocidad de la capa superior	100%
Velocidad del relleno sólido	100%
Velocidad del soporte escaso	100%
Velocidad de soporte densa	100%
Velocidad de movimiento XY	9000,0 mm/min
Velocidad de movimiento Z	1002,0 mm/min

Tabla A. 28. Parámetros de Velocidad para Zanahoria Deshidratada.

A.5. Parámetros de Brócoli Deshidratado

Extrusor	
Parámetro	Valor
Diámetro de la boquilla	1,50 mm
Multiplicador de extrusión	3
Ancho de extrusión	1,50 mm
Usar retracciones	[Marcado]
Distancia de retracción	3,00 mm
Distancia adicional de reinicio	0,01 mm
Retraer elevación vertical	0,50 mm
Velocidad de retracción	300,0 mm/min
Corte de flujo	[Marcado]
Distancia de corte de flujo	3,00 mm
Limpiar boquilla	[Marcado]
Distancia de limpieza	3,00 mm

Tabla A. 29. Parámetros del Extrusor para Brócoli Deshidratado.

Capa	
Parámetro	Valor
Altura de la capa	2,0000 mm
Capas sólidas superiores	3
Capas sólidas inferiores	3
Perímetros	2
Altura de la primera capa	100%
Ancho de la primera capa	100%
Velocidad de la primera capa	100%

Tabla A. 30. Parámetros de Capa para Brócoli Deshidratado.

Capas solidas	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno externo	Rectilíneo
Rotación de patrones externos	0 deg
Área de umbral de relleno sólido	25,0 mm ²
Expansión adicional de relleno sólido	0,0 mm

Tabla A. 31. Parámetros de Capas Sólidas para Brócoli Deshidratado.

Temperatura	
Parámetro	Valor
Habilitar el controlador de temperatura	[Marcado]
Temperatura del Extrusor	50 °C

Tabla A. 32. Parámetros de Temperatura para Brócoli Deshidratado.

Relleno	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno interno	Triangular
Rotación de patrones internos	0 deg
Porcentaje de relleno interno	30%
Ancho de relleno	100%
Capas de combinación de relleno	1
Superposición al contorno	15%
Longitud mínima de relleno	3,0 mm
Capas de relleno denso	0
Porcentaje de relleno denso	75%

Tabla A. 33. Parámetros del Relleno para Brócoli Deshidratado.

Relleno de Soporte	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno de soporte	Alineado
Porcentaje de relleno de soporte	30%
Capas de soporte base	1
Distancia de infación adicional	0 mm
Combinar capas del soporte	1 capas
Capas superiores del soporte denso	3
Capas inferiores del soporte denso	3
Porcentaje de relleno del soporte denso	75%
Expansión extra del soporte denso	0,00 mm
Separación horizontal	0,50 mm
Capas de separación verticales	2
Capas de separación verticales inferiores	2

Tabla A. 34. Parámetros del Relleno de Soporte para Brócoli Deshidratado.

Velocidades	
Parámetro	Valor
Velocidad de impresión por defecto	300,0 mm/min
Velocidad del perímetro exterior	100%
Velocidad del perímetro interior	100%
Velocidad de la capa superior	100%
Velocidad del relleno sólido	100%
Velocidad del soporte escaso	100%
Velocidad de soporte densa	100%
Velocidad de movimiento XY	9000,0 mm/min
Velocidad de movimiento Z	1002,0 mm/min

Tabla A. 35. Parámetros de Velocidad para Brócoli Deshidratado.

A.6. Parámetros de Lombarda Deshidratada

Extrusor	
Parámetro	Valor
Diámetro de la boquilla	1,50 mm
Multiplicador de extrusión	2,7
Ancho de extrusión	1,00 mm
Usar retracciones	[Marcado]
Distancia de retracción	3,00 mm
Distancia adicional de reinicio	0,01 mm
Retraer elevación vertical	0,50 mm
Velocidad de retracción	300,0 mm/min
Corte de flujo	[Marcado]
Distancia de corte de flujo	3,00 mm
Limpiar boquilla	[Marcado]
Distancia de limpieza	3,00 mm

Tabla A. 36. Parámetros del Extrusor para Lombarda Deshidratada.

Capa	
Parámetro	Valor
Altura de la capa	2,0000 mm
Capas sólidas superiores	3
Capas sólidas inferiores	3
Perímetros	2
Altura de la primera capa	100%
Ancho de la primera capa	100%
Velocidad de la primera capa	100%

Tabla A. 37. Parámetros de Capa para Lombarda Deshidratada.

Capas solidas	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno externo	Rectilíneo
Rotación de patrones externos	0 deg
Área de umbral de relleno sólido	25,0 mm ²
Expansión adicional de relleno sólido	0,0 mm

Tabla A. 38. Parámetros de Capas Sólidas para Lombarda Deshidratada.

Temperatura	
Parámetro	Valor
Habilitar el controlador de temperatura	[Marcado]
Temperatura del Extrusor	50 °C

Tabla A. 39. Parámetros de Temperatura para Lombarda Deshidratada.

Relleno	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno interno	Triangular
Rotación de patrones internos	0 deg
Porcentaje de relleno interno	30%
Ancho de relleno	100%
Capas de combinación de relleno	1
Superposición al contorno	15%
Longitud mínima de relleno	3,0 mm
Capas de relleno denso	0
Porcentaje de relleno denso	75%

Tabla A. 40. Parámetros del Relleno para Lombarda Deshidratada.

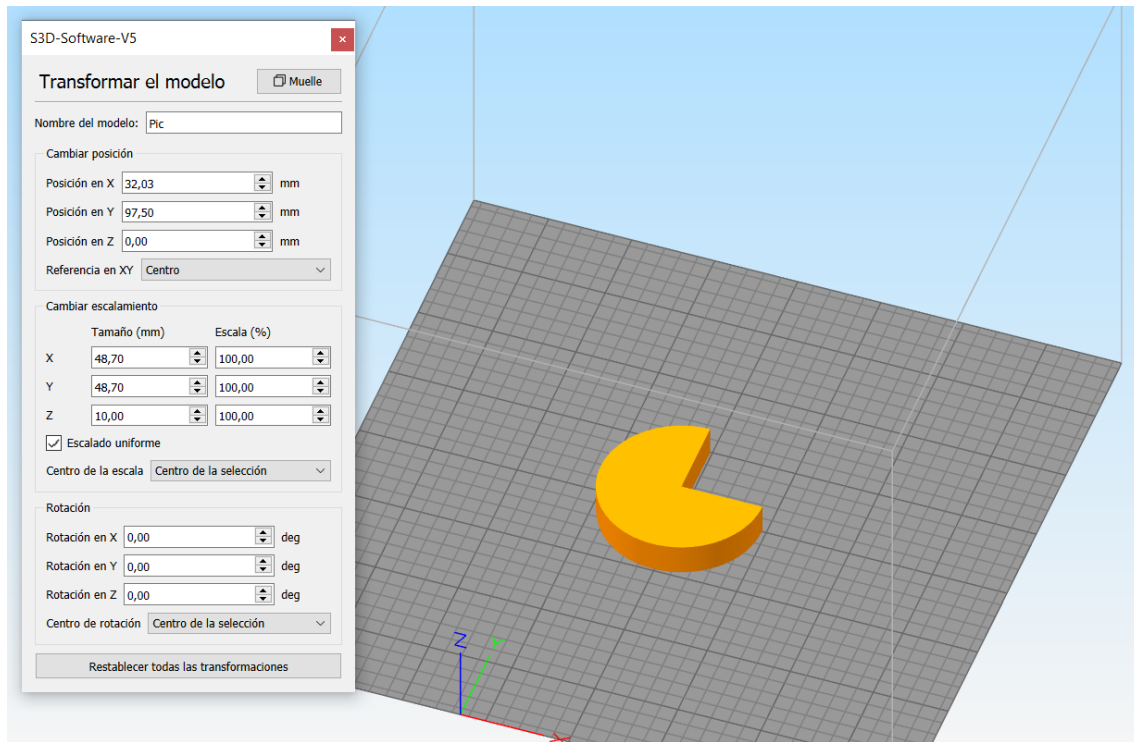
Relleno de Soporte	
Parámetro	Valor
Patrón de relleno de soporte	Alineado
Porcentaje de relleno de soporte	30%
Capas de soporte base	1
Distancia de infación adicional	0 mm
Combinar capas del soporte	1 capas
Capas superiores del soporte denso	3
Capas inferiores del soporte denso	3
Porcentaje de relleno del soporte denso	75%
Expansión extra del soporte denso	0,00 mm
Separación horizontal	0,50 mm
Capas de separación verticales	2
Capas de separación verticales inferiores	2

Tabla A. 41. Parámetros del Relleno de Soporte para Lombarda Deshidratada.

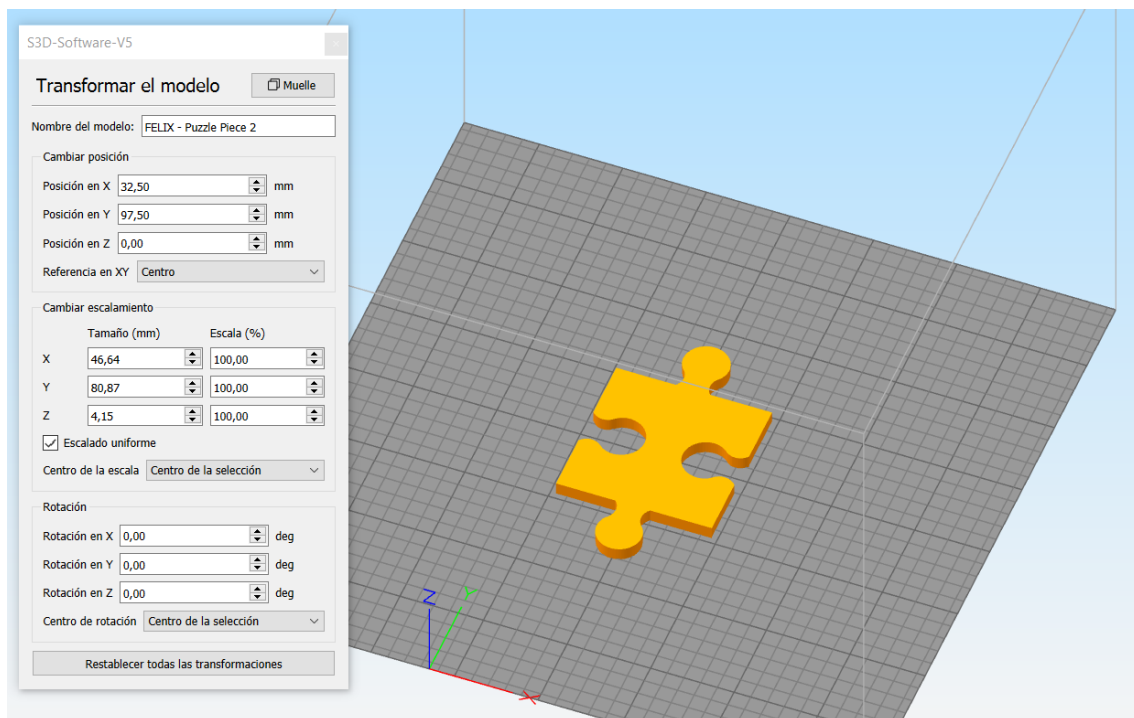
Velocidades	
Parámetro	Valor
Velocidad de impresión por defecto	300,0 mm/min
Velocidad del perímetro exterior	100%
Velocidad del perímetro interior	100%
Velocidad de la capa superior	100%
Velocidad del relleno sólido	100%
Velocidad del soporte escaso	100%
Velocidad de soporte densa	100%
Velocidad de movimiento XY	9000,0 mm/min
Velocidad de movimiento Z	1002,0 mm/min

Tabla A. 42. Parámetros de Velocidad para Lombarda Deshidratada.

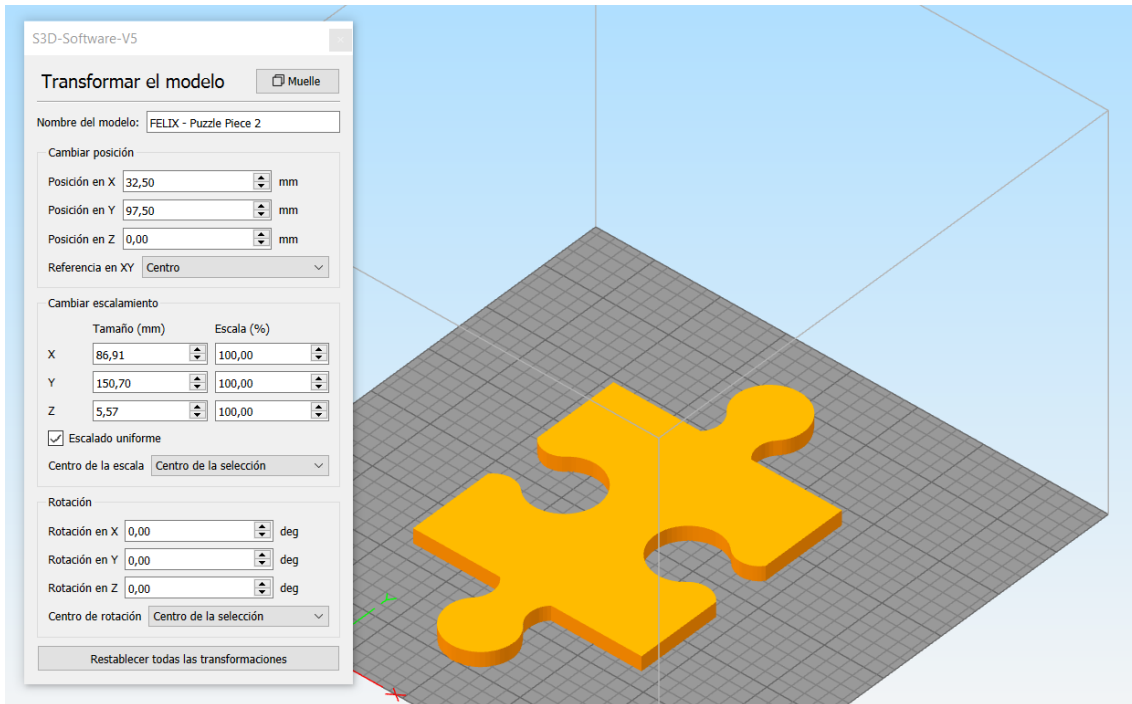
Anexo B. Geometrías de Impresión 3D Generadas en Simplify3D



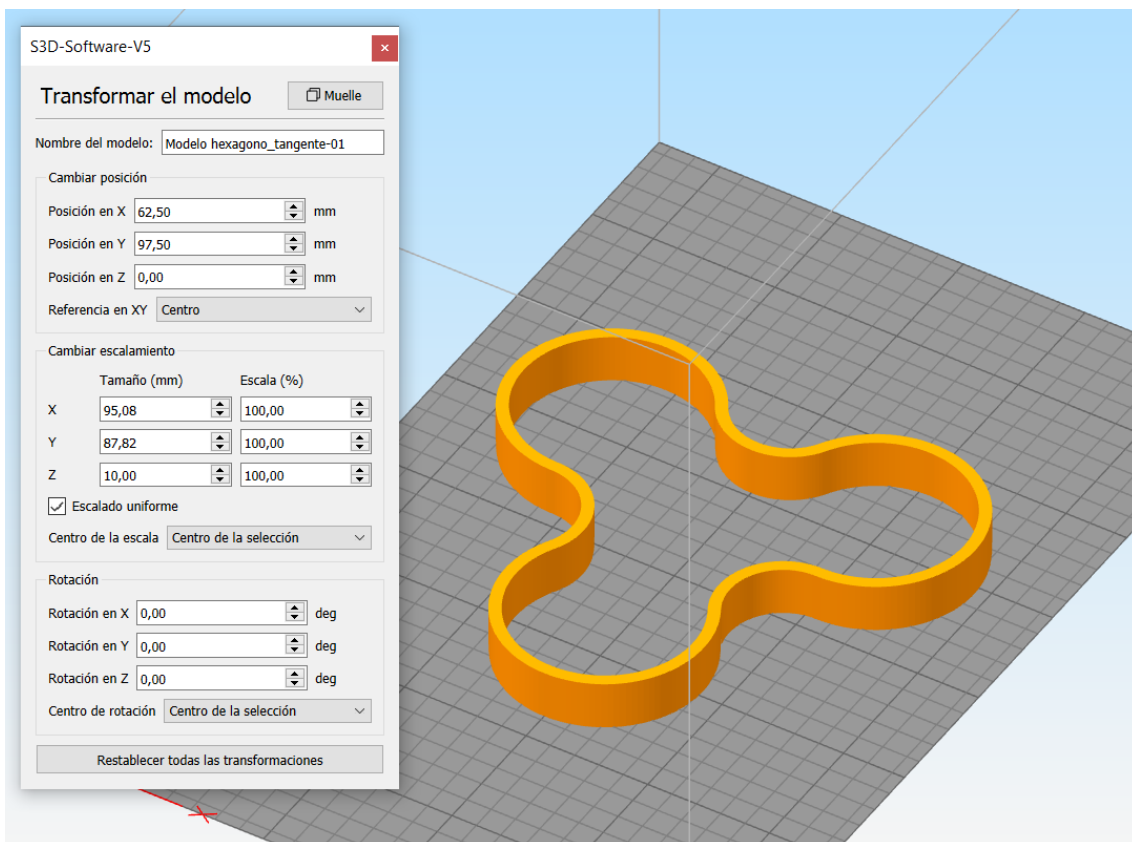
Modelo B. 1. Figura Circular Segmentada.



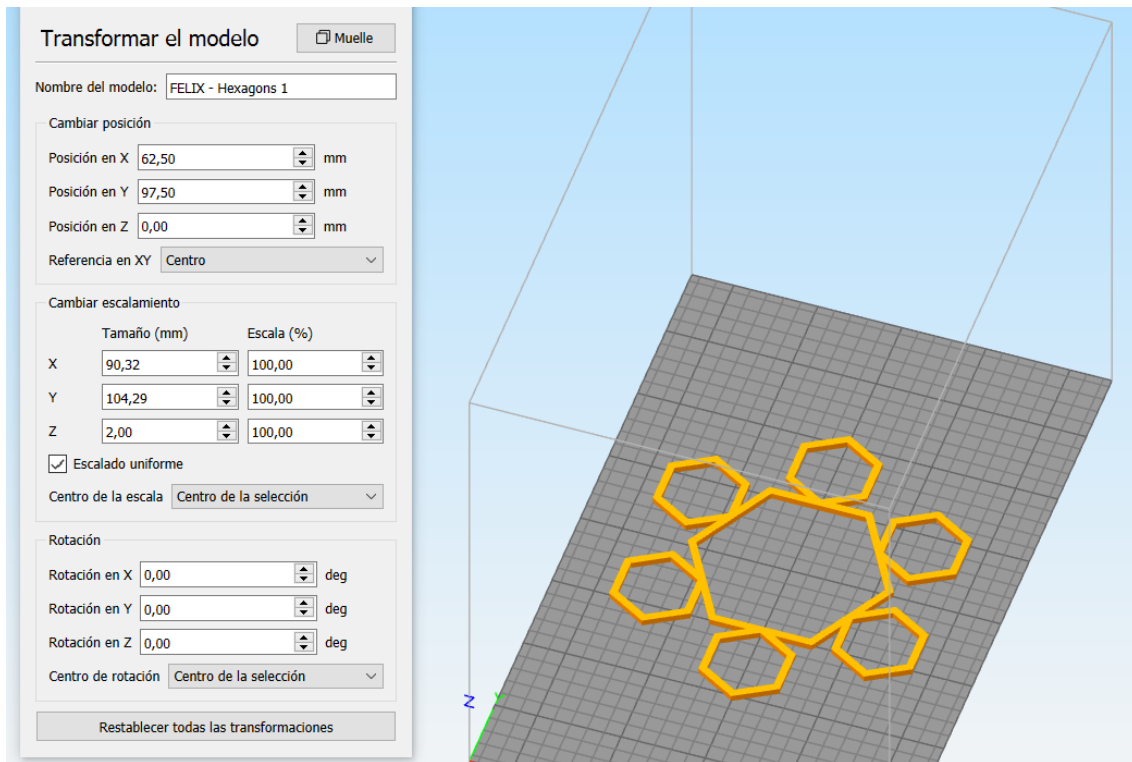
Modelo B. 2. Pieza de Puzzle Pequeña.



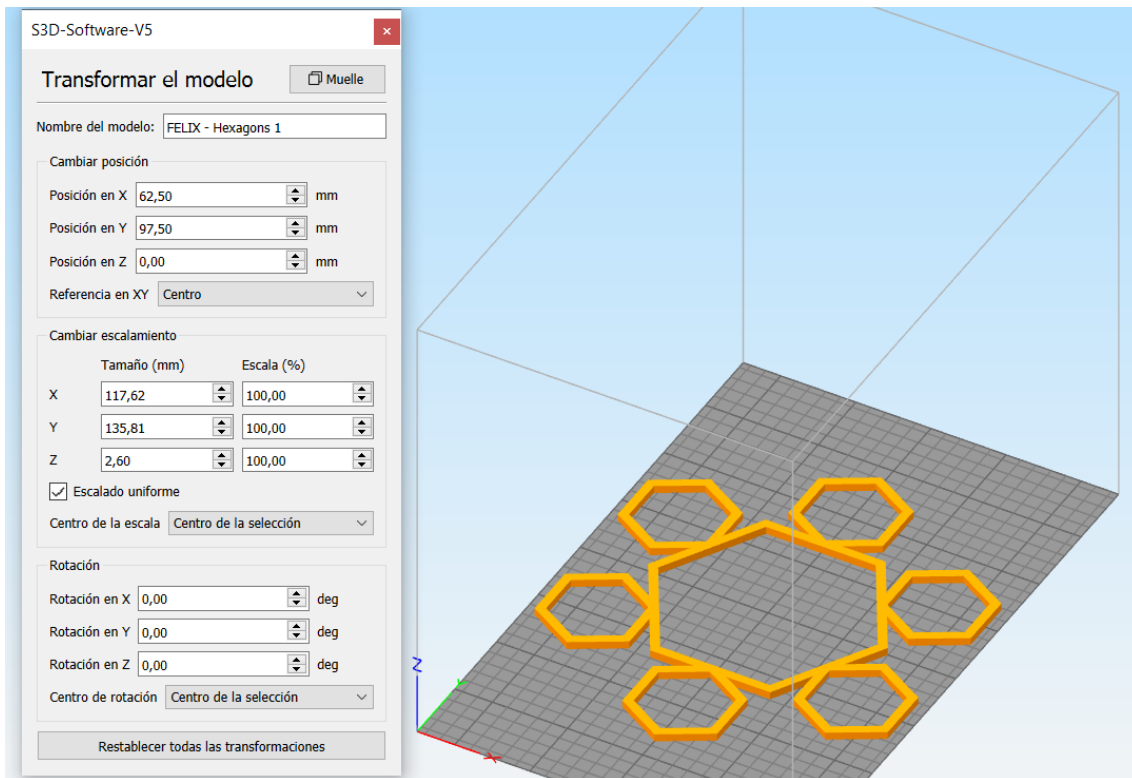
Modelo B. 3 Pieza de Puzzle Grande.



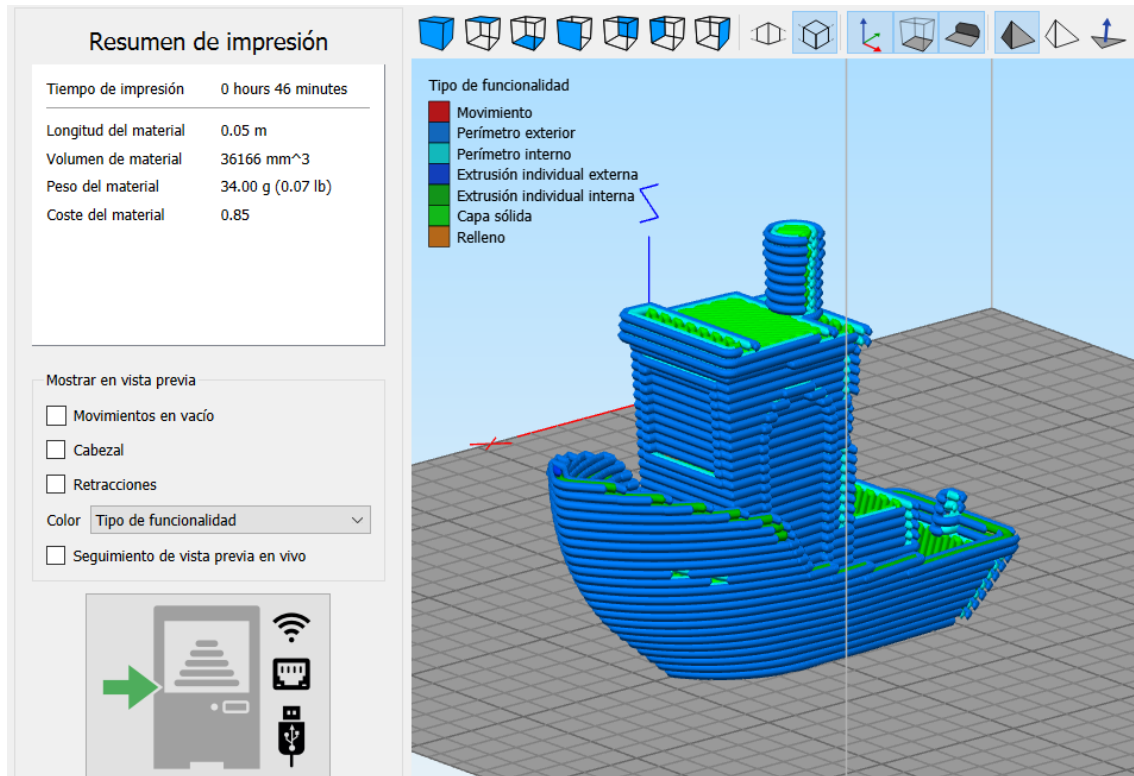
Modelo B. 4. Figura Trilobular Cerrada.



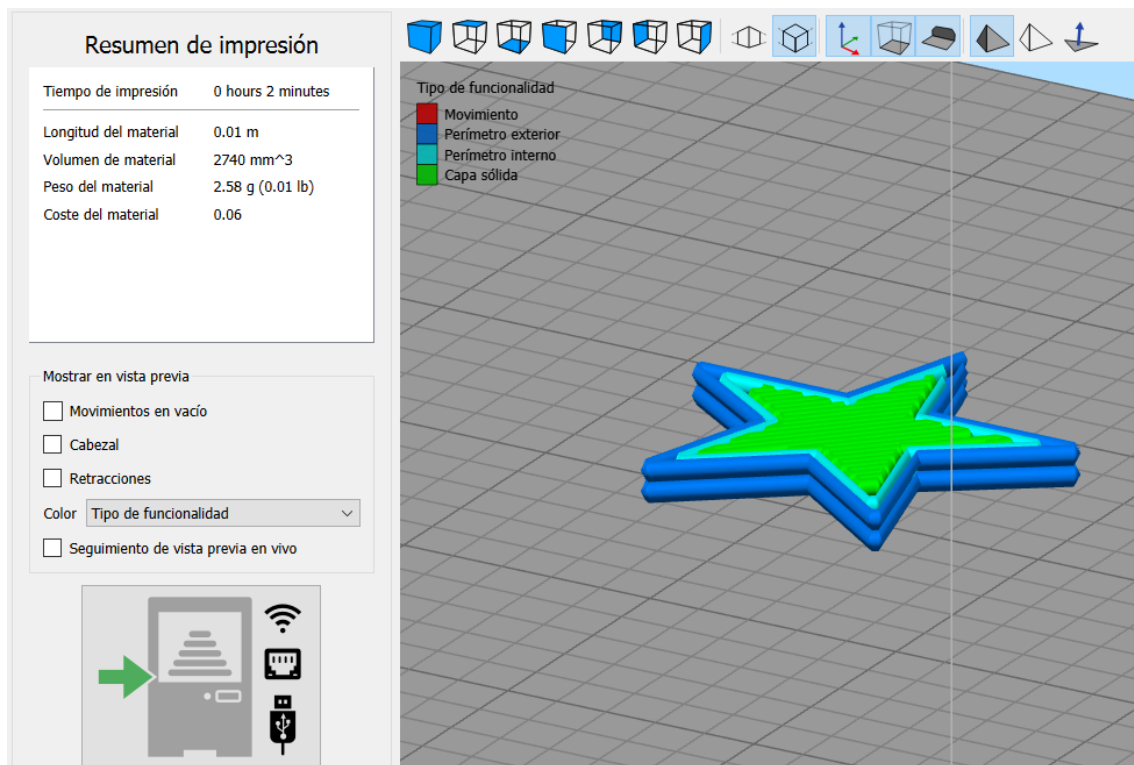
Modelo B. 5. Estructura Hexagonal Radial Pequeña.



Modelo B. 6. Estructura Hexagonal Radial Grande.



Modelo B. 7. Estructura en Forma de Barco.



Modelo B. 8. Estructura en forma de Estrella Multicapa.