



**UNIVERSITAT
ROVIRA i VIRGILI**

**ADAPTACIÓ DE PROTEÏNES ALTERNATIVES A TRAVÉS DE LA
UTILITZACIÓ D'UNA TECNOLOGIA INNOVADORA, LA
IMPRESSIÓ 3D D'ALIMENTS**

Marina Garcia Badia

TREBALL FINAL DE GRAU BIOTECNOLOGIA



Tutor acadèmic: Ingrid Aguiló Aguayo, departament de bioquímica i biotecnologia, ingrid.aguilo@irta.cat

Data de convocatòria: juny 2023

Jo, Marina Garcia Badia , amb DNI 21165183-P, soc coneixedora de la guia de prevenció del plagi a la URV *Prevenció, detecció i tractament del plagi en la docència: guia per a estudiants* (aprovada el juliol 2017) (<http://www.urv.cat/ca/vidacampus/serveis/crai/que-us-oferim/formacio-competencies-nuclears/plagi/>) i afirmo que aquet TFG no constitueixen cap de les conductes considerades com a plagi per la URV.

Tarragona, 07 de juny de 2023

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'M. Garcia Badia', written over a horizontal line.

ÍNDIX

1	Introducció	4
2	Objectius.....	4
3	Metodologia	5
4	Marc teòric	5
4.1	Tecnologia impressió 3D	5
4.2	Tipus de proteïna alternativa i legislació Europea	12
4.2.1	Proteïnes vegetals.....	13
4.2.2	Carn in vitro o cultivada al laboratori	14
4.2.3	Insectes comestibles.....	15
4.2.4	Proteïnes unicel·lulars	15
5	Seguretat alimentària	17
5.1	Carn cultivada o in vitro	18
5.2	Insectes.....	18
5.3	Proteïnes unicel·lulars	19
5.4	Seguretat de les impressores 3D.....	20
6	Optimització de la imprimibilitat	20
6.1	Propietats reològiques.....	21
6.2	Paràmetres d'impressió.....	22
7	Ingredients per al desenvolupament de productes 3D	25
7.1	Texturitzants	26
7.1.1	Hidrocol·loides.....	26
7.1.2	Midó de patata.....	28
7.2	Aplicació de la proteïna alternativa a la impressió 3D.....	30
7.2.1	Proteïnes vegetals.....	30
7.2.2	Microalgues.....	32
7.2.3	Insectes.....	36
7.2.4	Carn in vitro o cultivada	37
7.3	Altres ingredients	38
7.3.1	Impressió 3D basada en subproductes de carn	38
7.4	Ingredients que permeten un millor post procesament.....	39
8	Aplicacions	41
8.1	Nutrició personalitzada.....	41
8.2	Fàrmacs	41
8.3	Disfàgia	42
8.4	Al·lèrgies.....	44

8.5	Alimentació infantil	45
8.6	Aliments funcionals i productes nutracèutics	46
8.6.1	Vitamina C	46
8.6.2	Probiòtics	46
8.7	Anàlegs de carn	49
8.8	Nutrició personalitzada dels astronautes	49
9	Perspectives Futures	50
10	Conclusions	52
11	Autoavaluació	56
12	Agraïments	56
13	Referències	56

1 Introducció

Aquest treball de fi de grau és un treball bibliogràfic, en el qual s'ha fet una investigació exhaustiva sobre la impressió 3D d'aliments i les proteïnes alternatives. La impressió 3D és una tecnologia que s'ha utilitzat en diferents camps, però aquest treball es centra en l'aplicació alimentària.

S'ha escollit aquesta temàtica perquè la impressió 3D d'aliments és una tecnologia emergent i encara queden molts de reptes per superar. Per aquest motiu s'ha fet una anàlisi de la literatura des d'un punt de vista biotecnològic amb l'objectiu de millorar el disseny de les tintes imprimibles comestibles i optimitzar la impressió. El desenvolupament tecnològic de la impressió 3D juntament amb la comercialització d'aliments derivats de proteïnes alternatives (proteïna plant-based, insectes, algues, carn cultivada, etc) poden resoldre els problemes derivats de la producció tradicional de la carn (alt consum de recursos, emissions de gasos d'efecte hivernacle i malalties zoonòtiques). Per aquest motiu, un dels punts on s'ha fet més èmfasi en aquest treball és en l'ús de proteïnes alternatives com a matèries primeres per a fer les tintes imprimibles.

No obstant això, abans de comercialitzar aquests aliments innovadors, aquests han de complir amb les normatives (Europees), han de garantir la seguretat alimentària i els drets dels consumidors, aquests punts també es tracten en aquest projecte.

Les preguntes que es volen resoldre en aquest treball de fi de grau són: quines són les perspectives de futur, quines són les aplicacions que ens pot brindar la tecnologia 3D d'aliments, com podem millorar els paràmetres d'impressió i les propietats reològiques de les tintes, entre altres.

2 Objectius

L'objectiu general d'aquest treball de fi de grau és investigar i analitzar la tecnologia de la impressió 3D d'aliments i les proteïnes alternatives des d'un punt de vista biotecnològic, amb l'objectiu de millorar el disseny de les tintes imprimibles i optimitzar el procés d'impressió. S'aborda la necessitat de garantir la conformitat amb les normatives europees i la seguretat alimentària en la comercialització d'aliments impresos en 3D. En resum, l'objectiu és contribuir al coneixement i desenvolupament d'aquestes tecnologies emergents i explorar el

seu potencial per abordar els reptes i oportunitats en la producció d'aliments i la sostenibilitat alimentària.

3 Metodologia

La recollida de dades s'ha realitzat a partir de la literatura científica i els documents de patents utilitzant les bases de dades Scopus, Web of Science i PubMed. A més, s'han usat pàgines web com la pàgina oficial de l'EFSA i la pàgina web del ministeri, entre altres. Totes les fonts s'han citat en format Mendeley, mitjançant el gestor bibliogràfic Mendeley.

La recerca bibliogràfica s'ha fet durant el transcurs del segon quadrimestre de 4t de carrera, però la recerca i la investigació intenses s'han fet durant els últims 3 mesos del curs aprofitant el coneixement adquirit a la modalitat alimentària del grau de Biotecnologia. La última data en que s'ha fet la recerca bibliogràfica ha estat la setmana prèvia d'entrega del TFG.

El criteri principal de selecció d'estudis ha estat l'any en que han sigut publicats (últims 5 anys), tot i això, si un article recent ha fet referència a un estudi amb una antiguitat superior a 5 anys i aporta dades rellevants o informació important per concretar algun dels punts tractats, s'ha tingut en compte igualment. Cal destacar, que donada la novetat de la tecnologia, els avenços científics són molt recents. Les paraules clau usades han estat diferent depèn de l'objectiu de la recerca. De manera més general s'han usat els termes "3D food Printing" i "alternative protein". Aquests termes s'han complementat amb termes més específics conforme avançava la meua investigació: "rheological properties", "meat analogs", "novel protein", "extrusion-based food Printing".

S'han analitzat més de 50 documents.

4 Marc teòric

4.1 Tecnologia impressió 3D

La impressió tridimensional d'aliments (3DFP) és una tecnologia emergent que utilitza conceptes de fabricació additiva per produir productes dissenyats a mida amb ingredients alimentaris en presentacions en pols, líquid, massa o pasta. En alguns casos, s'utilitzen additius, com ara hidrocol·loides, midó, enzims... 3DFP

dona llibertat a l'hora de personalitzar els dissenys, té el potencial de crear noves textures i de personalitzar els aliments amb requeriments nutricionals específics.

Com podem veure a la [figura 1](#) la primera etapa crucial de la impressió 3D és la correcta elecció dels ingredients i el pretractament d'aquests, ja que, els ingredients han de poder ser imprimibles, i de vegades s'han de pretractar amb additius per a millorar la reologia de la tinta. Per a donar imprimibilitat als ingredients, aquests es poden moldre (per a fer pols), és poden coure (en cas de verdures i fruites...), etc.

La segona etapa és la impressió. En primer lloc, el model de l'estructura desitjada es crea mitjançant un software (CAD). A continuació, el model es converteix en fitxer stl. i s'envia a un software de tall, on es creen les capes del model i s'ajusten els paràmetres d'impressió (velocitat, alçada del broquet...). Finalment, un fitxer de codi G (un llenguatge de programació utilitzat per donar instruccions) envia les instruccions a la impressora que després construeix l'estructura desitjada. La tercera fase és el tractament de post impressió, per exemple, congelar, coure o fregir l'aliment, en són els exemples més habituals.

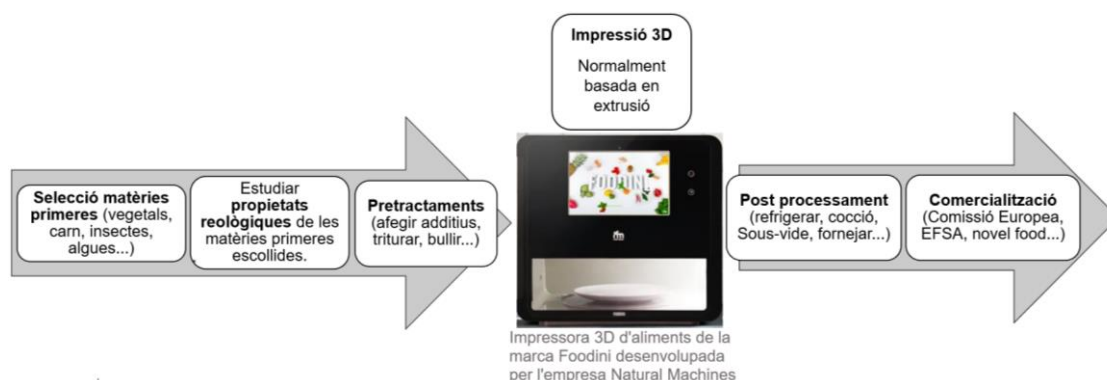


Fig. 1 Procediment per a una impressió d'aliments tridimensional eficaç. Imatge de creació pròpia.

Aquesta tecnologia presenta un gran potencial, ja que permet adaptar aliments a les necessitats nutricionals i mèdiques individuals, incorporant els nutrients necessaris i alhora conservant un aspecte visual agradable i garantir les característiques organolèptiques tradicionals com l'olor, la textura, etc. A més, l'aplicació de la impressió 3D també pot afavorir el consum de fruites i verdures i fonts alternatives de nutrients en nens o pacients.

Malgrat els avenços recents, encara hi ha una infinitat de reptes a superar. La [taula 1](#) presenta una llista dels avantatges i les limitacions de l'ús de la impressió 3D.

Taula 1 Llista dels avantatges i limitacions de l'ús de la 3DPF.

AVANTATGES	LIMITACIONS
Alimentació personalitzada.	Encara presenta elevats costos associats.
Llibertat per dissenyar estructures i textures visuals noves i més complexes (important en la cuina gourmet, restaurants...).	Té encara un baix nombre de materials adequats i compatibles (hi ha molts de materials estudiats, però encara no comercialitzats).
Reducció del malbaratament alimentari, ja que es poden reutilitzar residus de indústria càrnica, pesquera...	La impressió encara és molt lenta.
Ajuda a fer fronts problemes de salut (disfàgia, al·lèrgies, problemes digestius...).	Pot presentar problemes de seguretat alimentària i en la higiene de la impressora (falten més controls microbiològics).
Evita la contaminació creuada (essencial per a persones amb al·lèrgies alimentàries).	La percepció dels consumidors.
Permet dissenyar aliments més atractius per a nens i pacients.	Precisió d'impressió limitada.
	Limitacions de volum si es vol produir grans en grans quantitats, tot i que la tecnologia està avançant molt ràpidament.
	Encara falten estudis per a millorar el post processament (cocció, refrigeració...).

Un dels múltiples avantatges que ofereix la tecnologia 3DFP és la seva capacitat per reduir el malbaratament d'aliments ja que permet reutilitzar materials que d'altra manera es descartarien, alhora que s'augmenta el seu valor nutricional, en cas desitjat.

Les tecnologies d'impressió 3D, aplicables a l'alimentació es poden classificar en les següents categories:

1. Sinterització selectiva per làser (SLS)
2. Sinterització d'aire calent (HAS)

3. "Binder jetting"
4. Extrusió
5. "Inkjet printing" o injecció de tinta

La sinterització utilitza principalment material a base de pols. En SLS (sinterització selectiva per làser), hi ha un làser infraroig que es reflecteix al llit de la impressora, aquest llit de la impressora conté el material en pols. El làser actua com una font de calor que fusiona selectivament el material en pols. El llit de pols es redueix a una capa més espessa i compacta. A continuació, s'incorpora una nova capa de partícules en forma de pols a sobre. El procés de sinterització es repeteix fins que l'objecte 3D és completat. El sistema SLS permet construir múltiples capes que contenen diferents substrats alimentaris (Godoi et al., 2016). SLS s'ha utilitzat per fabricar amb èxit estructures 3D complexes que utilitzen sucre o pols riques en sucre, com ara Pols NesQuik (Gray, 2010). Tanmateix, aquest procés només es limita a materials de base en pols.

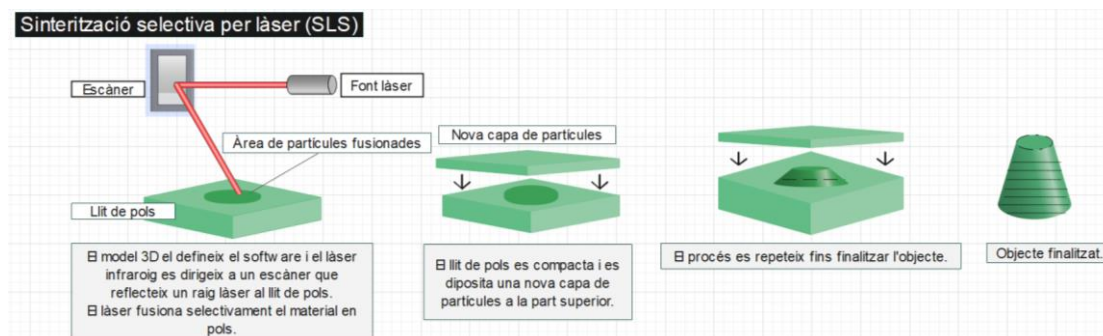


Fig. 2 Esquema explicatiu del funcionament de la sinterització selectiva per làser. Imatge de creació pròpia.

En la sinterització d'aire calent (HAS), un corrent d'aire calent a baixa velocitat es dirigeix al material en forma de pols, com el sucre, per formar una imatge bidimensional. Després de formar aquesta imatge, el llit de pols és lleugerament compactat i se torna a aplicar una fina capa de pols a la part superior, cobrint la primera capa, igual que en SLS. La pols no sinteritzada es pot reutilitzar. En aquest mètode, cal un post processament per eliminar l'excés de pols (Liu et al., 2017b).

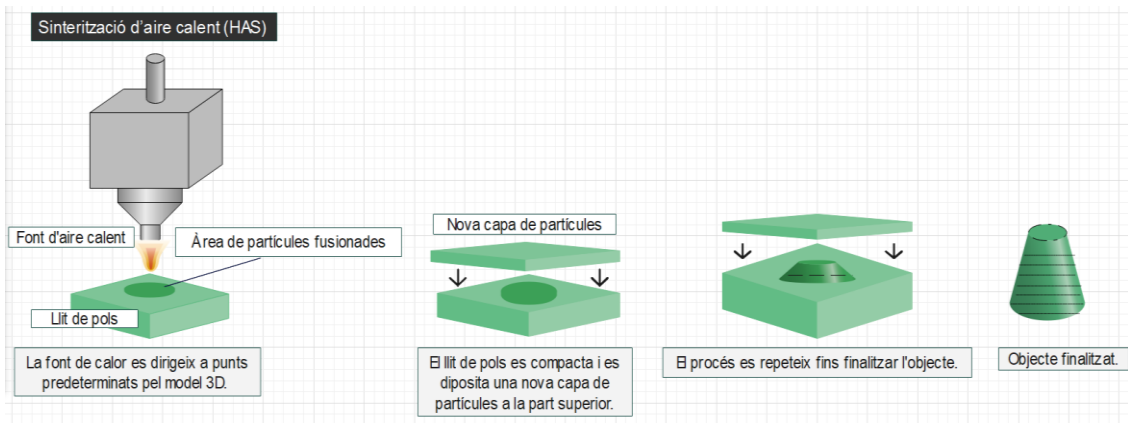


Fig. 3 Esquema explicatiu del funcionament de la sinterització d'aire calent. Imatge de creació pròpia.

La tècnica “Binder jetting” o unió líquida (LB) consisteix en unir material en pols a través d'un aglutinant líquid. El líquid actua com a aglutinant per al material en pols. Un exemple de aglutinants líquids són els aromes i colors líquids, els quals s'utilitzen per lligar material en pols com el sucre, per tal de fabricar per exemple, productes de rebosteria únics, complexos i boníssims (Shirazi et al., 2015).

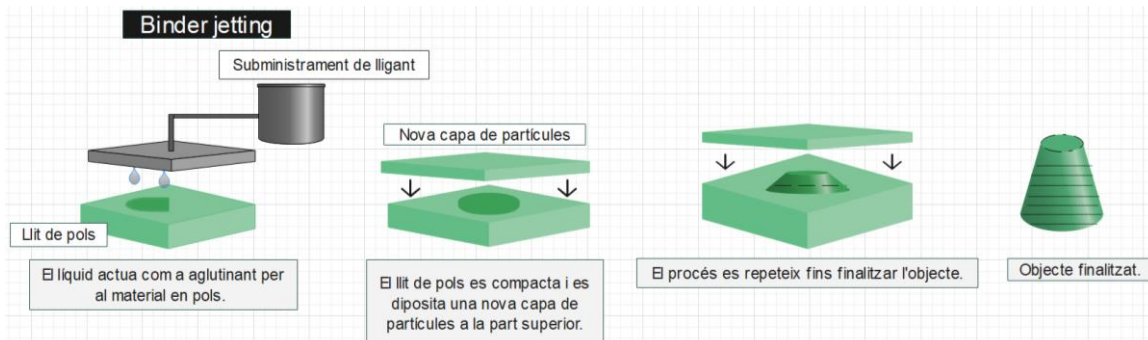


Fig. 4 Esquema explicatiu del funcionament de la unió líquida. Imatge de creació pròpia.

Inkjet Printing o injecció de tinta (IJP) s'usa principalment per a decoracions i farcits, ja que diposita materials de baixa viscositat a través d'un capçal tèrmic sobre una estructura de suport. Un exemple d'aquesta tecnologia aplicada al disseny d'aliments és la impressora Chefjet de 3D System que utilitza el procés d'injecció de tinta per produir una àmplia gamma de receptes de rebosteria amb sucre, fondant...

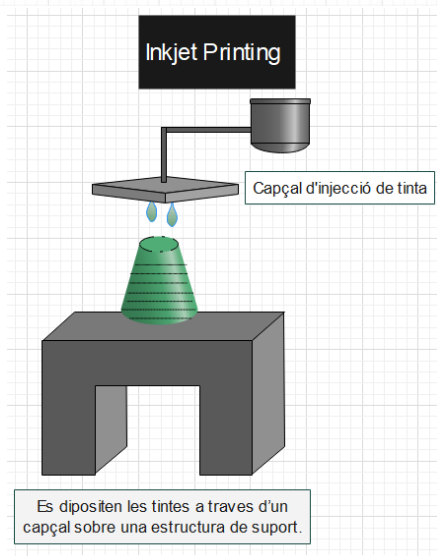


Fig. 5 Funcionament de la injecció de tinta. Imatge de creació pròpia.

La tecnologia d'extrusió generalment s'aplica a un material fos. L'extrusió és el millor mètode per a ingredients d'aliments frescos (Godoi et al., 2016; Hao et al., 2010), ja que la majoria dels aliments frescos es poden barrejar i liquar i formar una tita pseudo-sòlida adequada per a la extrusió. Aquest treball de fi de grau es centra en la impressió basada en extrusió.

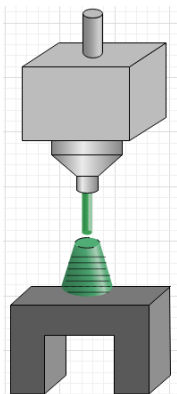


Fig. 6 Impressora basada per extrusió. Imatge de creació pròpia.

Les tintes comestibles imprimibles fan referència als materials alimentaris que són usats en la impressió 3D d'aliments. En la impressió 3D basada en extrusió, les tintes comestibles imprimibles es poden dividir en dues categories:

1. Matèries primeres alimentàries tradicionals:

Els aliments tradicionals es divideixen en dos categories, els que requereixen additius i els que no. Alguns materials alimentaris que es poden extruir fàcilment pel broquet de la impressora sense necessitat d'additius són la xocolata (fosa) i el formatge, mentre que altres materials alimentaris com la fruita, la verdura, el puré de patates, etc., requereixen l'addició d'additius per millorar les propietats reològiques del material de manera que es pugui extruir pel broquet d'extrusió.

Els additius afegits a les tintes comestibles tenen un paper important en la millora del comportament de flux, la sedimentació i les propietats lubricants del material subministrat. Per exemple, (L. Wang et al., 2018) va afegir NaCl al surimi per millorar les propietats dels materials per fer gels de surimi. (J. Lipton et al., 2010a) van provar amb èxit la possibilitat d'utilitzar gall dindi, vieires i api tractats amb transglutaminasa per a permetre el seu cuinat després de la impressió.

2. Materials alimentaris no tradicionals. Els insectes, les algues marines, la carn cultivada i els subproductes d'origen animal també s'utilitzen en la tecnologia d'impressió 3D d'aliments. (Severini, Azzollini, et al., 2018) van estudiar la imprimibilitat i les característiques d'aperitius impresos en 3D obtinguts utilitzant pols de cuc groc (*Tenebrio molitor*) en lloc de farina de blat. Els resultats van mostrar que l'addició de pols de cuc groc de la farina va canviar la imprimibilitat de la massa i va augmentar significativament el contingut de proteïna.

Els materials alimentaris no tradicionals, com els insectes i les algues, afavoreixen un desenvolupament respectuós amb el medi ambient i també permeten fer front a la demanda creixent d'aliments. Aquest treball es centra en l'ús de les proteïnes alternatives, tot i que s'ha inclòs algun estudi amb materials tradicionals per a complementar la informació.

La introducció de la impressió 3D a la tecnologia alimentària es va originar quan els investigadors de la Universitat de Cornell van desenvolupar el model Fab@home™. Com a conseqüència dels esforços realitzats pels investigadors en aquest camp, el ventall de models d'impressora s'ha ampliat. Avui, diverses empreses han desenvolupat nous models d'impressores:

- Foodjet™ (The Grood Innovations, Holanda)
- Foodini™ (Natural Machines, Espanya)
- Choc Creator™ (Choc Edge Ltd., Regne Unit)
- Fab@Home™ (Creative Machines Lab, EUA)

Una impressora 3D basada en extrusió típica consisteix en:

- Circuit de control per integrar l'ordinador i la impressora
- Motor
- Cambra de mescla per emmagatzemar i barrejar les tintes
- Reguladors de pressió
- Boquets
- Una plataforma d'impressió sobre la qual s'imprimeix el menjar

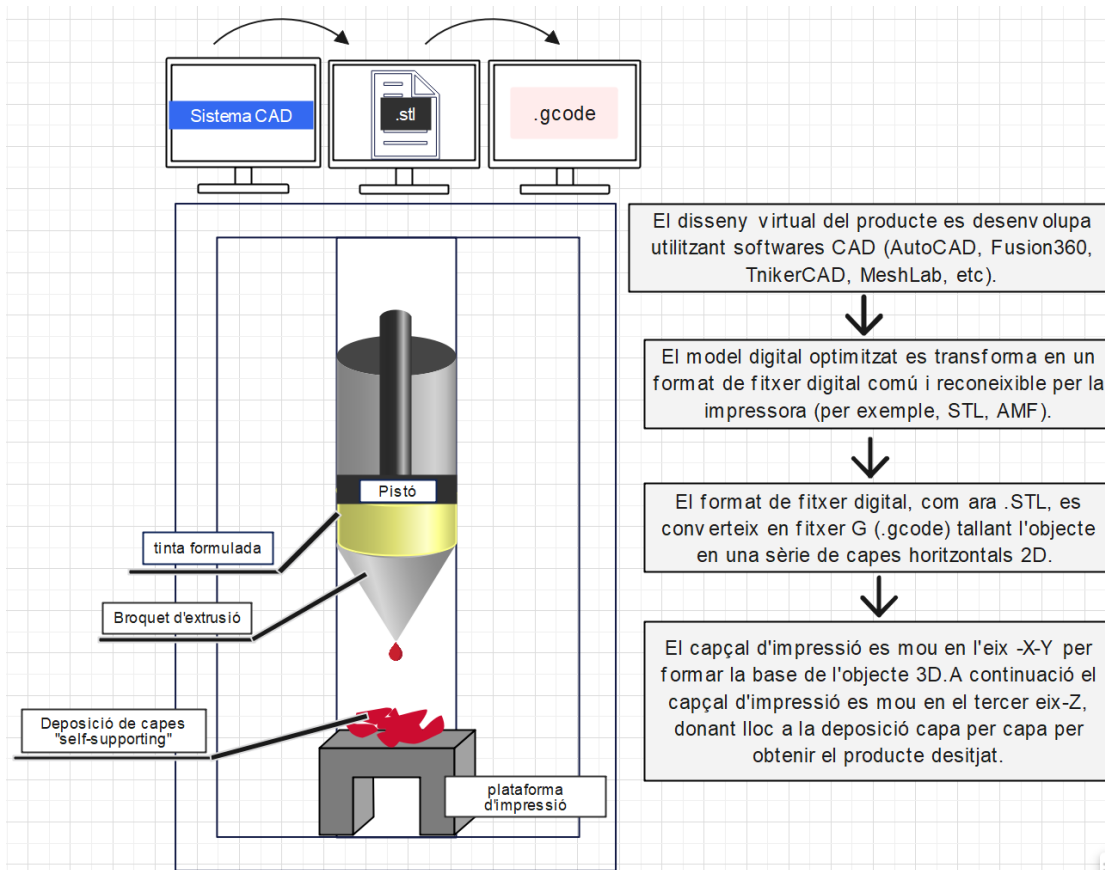


Fig. 7 Esquema descriptiu de les parts i funcionament de la impressió basada per extrusió. Imatge de creació pròpia.

4.2 Tipus de proteïna alternativa i legislació Europea

Les proteïnes alternatives són fonts de proteïna que provenen de fonts diferents a la carn, peix, marisc, productes lactis o els ous. Són alternatives a les proteïnes animals i són utilitzades per aportar nutrients i proteïnes als productes alimentaris. A Europa s'estan desenvolupant les següents alternatives proteiques: proteïna vegetal, carn cultivada al laboratori, SCP i insectes comestibles.

La carn és un dels principals causants del canvi climàtic per les elevades emissions de gasos d'efecte hivernacle i per l'ús exacerbant de la terra i l'aigua. L'impacte perceptible del canvi climàtic induït per l'home inclou l'augment de la temperatura, les sequeres, les inundacions i altres esdeveniments meteorològics greus. També s'ha previst que el canvi climàtic afectarà totes les facetes de la seguretat alimentària (disponibilitat, la facilitat d'accés, el consum i l'estabilitat) (Ramachandriah, 2021). Actualment es demana i es recomana reduir el consum de carn. Una reducció important del consum de carn comportaria beneficis per al

medi ambient i per a la salut humana als països occidentals (Westhoek et al., 2014).

Per mitigar l'amenaça del canvi climàtic provocada per la producció de carn ramadera, es proposa fer canvis en la dieta, desenvolupar tecnologies innovadores (com la 3DPF) i reduir el malbaratament dels aliments (Ramachandraiah, 2021). La tecnologia 3DPF té un gran potencial per reduir les emissions de CO₂ i pot ajudar a tirar la proteïna alternativa cap endavant.

A continuació, s'exposa els diferents tipus de proteïna alternativa que es pot usar en la impressió 3D juntament amb la legislació alimentària europea. La legislació alimentària de la UE ha de garantir la seguretat alimentària i els drets dels consumidors, alhora que ha d'aplicar els principis de no discriminació i proporcionalitat.

Tots els aliments nous no transgènics s'avaluen actualment d'acord amb el Reglament sobre nous aliments que es va adoptar el 2015 (UE/2015/2283). El Reglament s'aplica a tots els aliments que no es consumien a Europa abans de 1997, incloses totes les plantes i fruits que s'han utilitzat a tercers països però no a Europa. D'acord amb el Reglament General d'Aliments EU/178/2002, els procediments previs a la comercialització s'han de basar en una avaluació científica del risc i han de ser transparents. En els procediments europeus tant d'aliments nous com de transgènics, els operadors d'empreses alimentàries són responsables de demostrar la seguretat i l'impacte nutricional dels seus productes.

4.2.1 Proteïnes vegetals

L'avantatge de les proteïnes vegetals és que la producció necessita menys recursos naturals i provoca menys emissions de gasos d'efecte hivernacle, en comparació als animals de granja. Els avenços tecnològics, com la impressió 3D d'aliments, poden ajudar a millorar l'atractiu de les proteïnes vegetals.

Les proteïnes vegetals, especialment les de plantes lleguminoses com la soja, el cigró i les llenties, s'han utilitzat tradicionalment per la seva accessibilitat a la majoria de la població, pel seu baix cost, etc. No obstant això, tenen un PDCAAS (puntuació d'aminoàcids corregit per la digestibilitat de les proteïnes) baix (20%-60%) a causa del seu subministrament limitat d'aminoàcids essencials, per això

és necessari complementar la seva ingesta amb cereals i fruits secs (Anzani et al., 2020). Per tant, s'han buscat altres matrius vegetals amb perfils d'aminoàcids i digestibilitat més complets que els tradicionals. Una de les més utilitzades és la proteïna del pèsol, que és rica en aminoàcids essencials, excepte la metionina.

Pel que fa a la normativa, les llegums i moltes altres plantes riques en proteïnes és classifiquen com proteïnes alternatives però no com aliments nous a la UE, per exemple la soja, cigrons, llenties, pèsols i faves. Tot i que són aliments consumits abans del 1997 a Europa, si aquests aliments són impresos en 3D sí es consideren novel food pel seu procés de producció, independentment de si els ingredients són nous o no.

Les proteïnes vegetals s'utilitzen en diversos productes que imiten carn i llet. Beyond Meat, Heura i Impossible Foods són exemples d'empreses de carn d'origen vegetal. Empreses com Good Catch, Ocean Hugger i Loryma estan desenvolupant mariscs d'origen vegetal i, per exemple, Oatly, Valio i Alpro tenen les seves alternatives làctiques d'origen vegetal. L'empresa Nova Meat produeix bistecs de “vedella” a base de plantes mitjançant tecnologia d'impressió 3D.

4.2.2 Carn in vitro o cultivada al laboratori

Per cultivar carn en un laboratori, es recullen cèl·lules mare dels animals i s'afegeixen a un medi ric en nutrients on es multipliquen i creixen fins a convertir-se en teixit muscular. La carn cultivada té com a objectiu oferir una alternativa més respectuosa amb el medi ambient i amb els animals, sense renunciar al sabor i la textura. Tot i les seves bones intencions, la producció actual de carn cultivada, encara s'enfronta a importants barreres tècniques, reguladores i financeres.

Al desembre de 2020, l'Agència d'Aliments de Singapur va autoritzar el pollastre cultivat en laboratori. Aquesta va ser la primera autorització de carn cultivada al món.

Altres exemples d'empreses actuals que usen carn cultivada: MosamMeat, Memphis Meats, JUST Meat i Aleph Farms, Hoxton Farms.

A Europa, el teixit animal cultivat es considera un aliment nou a causa del nou procés de producció. Si les línies cel·lulars utilitzades al bioreactor estan modificades genèticament, s'aplica la regulació dels aliments transgènics.

4.2.3 Insectes comestibles

S'han estudiat diversos insectes comestibles com *Tenebrio molitor*, que mostren un contingut proteic entre el 49% i el 85% en farina d'insectes juntament amb aminoàcids essencials. Les proteïnes d'insectes comestibles tenen un excel·lent valor nutricional i bones propietats funcionals (Okagu et al., 2020). El processament d'aliments a partir de 3DFP mitjançant larves de cuc de farina (*T. molitor*) va reportar valors d'aminoàcids essencials entre el 6% i el 59% del valor de proteïna de referència i un PDCAAS (puntuació d'aminoàcids corregit per la digestibilitat de les proteïnes) del 73% (Severini, Derossi, et al., 2018).

Un dels avantatges més importants dels insectes és que es reproduïxen amb rapidesa i necessiten menys aliment que altres animals. No obstant això, menjar insectes no està exempt de riscos, ja que alguns poden tenir el potencial de desencadenar reaccions al·lèrgiques similars a les observades als mariscs. L'acceptació per part dels consumidors serà una barrera important per superar si els insectes s'introdueixen amb èxit a les dietes de la població d'Europa, ja que molts consumidors europeus encara no estan disposats a menjar insectes.

Respecte a la normativa europea, el Reglament europeu de nous aliments aplica a insectes sencers, parts d'insectes, farina d'insectes o extractes d'insectes que es comercialitzen a la UE. Les tres primeres sol·licituds que van superar els primers controls de validesa de la Comissió Europea i l'EFSA van ser les aplicacions sobre grill sec (*Gryllodes sigillatus*) i cuc de farina sec (*Tenebrio molitor*) tant sencer com molt i finalment, els productes amb farina de larves del cuc (*Alphitobius diaperinus*).

4.2.4 Proteïnes unicel·lulars

Les proteïnes unicel·lulars (SCP) es produeixen mitjançant el cultiu de línies cel·lulars microbianes. Cada cop augmenta més l'interès cap a proteïnes unicel·lulars ja que és una forma de produir biomassa de manera eficient i sostenible, amb un ús mínim del sòl i una petita aportació d'energia i substrats de creixement (Ritala et al., 2017). Els microbis es poden cultivar en una varietat

de substrats, entre ells el CO o el metà, proporcionant la possibilitat d'acoblar la producció de proteïnes amb els gasos efluent de la indústria (Ritala et al., 2017).

Com es pot veure a la [taula 2](#), s'han autoritzat quatre soques microbianes mitjançant el Reglament de nous aliments, encara que el seu ús està restringit als complements alimentaris o només es poden utilitzar en petites quantitats en productes alimentaris específics. La majoria dels microorganismes no entren sota la regulació dels nous aliments, degut a que ja es consumien a països de la UE abans de que aquesta entrés en vigor, en general són cianobacteris i microalgues, i inclouen tres espècies de *Chlorella*, *Arthrospira platensis* i *Spirulina sp.*

Taula 2 Microorganismes acceptats com a aliment a la UE.

Nom científic	Nom comú	Organismes	Estatus legal
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	AFA	Cyanobacterium	No és un novel food
<i>Spirulina sp.</i>	Espirulina	Cyanobacterium	No és un novel food
<i>Arthrospira platensis</i>	Espirulina	Cyanobacterium	No és un novel food
<i>Chlorella luteoviridis</i>	Chlorella	Microalga	No és un novel food
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Chlorella	Microalga	No és un novel food
<i>Chlorella vulgaris</i>	Chlorella	Microalga	No és un novel food
<i>Odontella aurita</i>		Microalga	Autoritzat com a novel food, ús autoritzat de petites quantitats en aliments específics
<i>Tetraselmis chuii</i>		Microalga	Autoritzat com a novel food, ús autoritzat de petites quantitats en aliments específics
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Llevat de la cervesa	Llevat	No és novel food*
<i>Fusarium venenatum</i>		Microfong	No és novel food*
<i>Yarrowia lipolytica</i>		Microfong	Novel food autoritzat únicament per a suplementes alimentaris

<i>Clostridium butyricum</i>		Bacteria	Novel food autoritzat únicament per a suplementos alimentaris
-------------------------------------	--	----------	---------------------------------------------------------------

Les microalgues són microorganismes, generalment formats per una sola cèl·lula, que es multipliquen ràpidament en una biomassa rica en nutrients, utilitzant aigua, llum i una font de nutrients, com el diòxid de carboni. Una microalga molt famosa és l'espíulina, la qual pot tenir fins al 70% de la massa seca com a proteïna. A més, la qualitat de la proteïna d'espècies com la *C. vulgaris* i la *A. platensis* és comparable a la de la soja.

La espíulina (*spirulina sp.* i *Arthrospira platensis*), presenten alts valors proteics i compostos bioactius amb característiques antioxidants, antihipertensives, immunomoduladores...Un altre tipus de microalga que s'ha estudiat en els darrers anys és el gènere *Chlorella*. S'ha identificat activitat prebiòtica en proteïnes d'aquesta alga i una aportació del 40% d'aminoàcids essencials en 1g de proteïna d'algues/L (Caporgno & Mathys, 2018).

Un dels productes proteics microbians amb més èxit és Quorn, que es produeix a partir de la micoproteïna del microfung *Fusarium venenatum*. És probablement la marca alternativa de carn més gran del món. Quorn és el producte de micoproteïnes més comú al mercat i es produeix des de 1985. Aquests productes es produeixen mitjançant un fermentador de cicle de pressió en mode aeròbic continu amb els fongs filamentosos *Fusarium venenatum*. La naturalesa ramificada del miceli fúngic s'aproxima a l'organització de les fibres musculars i ajuda al desenvolupament d'una textura semblant a la carn.

5 Seguretat alimentària

A continuació es descriu una anàlisi dels perills per a la seguretat alimentària. Entendre els efectes del processament i la seguretat de les proteïnes alternatives és fonamental per garantir la seguretat alimentària i protegir els consumidors. Amb l'augment del consum de proteïnes alternatives, el risc d'al·lèrgens alimentaris és evident. Tot i que s'estan abordant els perills dels insectes i les algues marines, altres alternatives proteiques com la carn cultivada i els SCP encara necessiten més investigació.

Després del COVID-19 s'ha fet molta més èmfasi en la seguretat alimentària i es creu que els aliments preparats amb menys manipulació humana poden reduir el risc de malalties transmeses pels aliments (Blutinger et al., 2023).

5.1 Carn cultivada o in vitro

Igual que amb els insectes, la introducció de carn cultivada al mercat de la UE requereix l'aprovació prèvia mitjançant el Reglament de nous aliments (258/97 CE). La producció de productes de cultiu cel·lular consta de les cinc etapes següents, tal com va descriure (Ong et al., 2021). En primer lloc, s'adquireixen cèl·lules de biòpsies d'animals vius o sacrificats. A continuació, el tipus cel·lular preferit s'aïlla i es multiplica en cultiu cel·lular (en flascons, plaques de Petri...). En aquesta etapa, es poden utilitzar antibiòtics/antimicòtics per evitar les infeccions de cultius cel·lulars. El següent pas té com a objectiu la producció de biomassa, on les cèl·lules preparades es transfereixen a bioreactors, on creixen encara més per diferenciar-se en el tipus de cèl·lula desitjat. A continuació, les cèl·lules es poden fer créixer en bastides tridimensionals fetes a partir de biomaterials naturals. Es poden afegir medis de cultiu que continguin nutrients i factors de creixement, com les hormones. Per últim, el producte es pot recollir retirant o no la bastida.

La producció de productes basats en cèl·lules s'ha de fer d'acord amb les bones pràctiques de fabricació (GMP) i amb un enfocament d'anàlisi de perills i punts de control crítics (APPCC).

5.2 Insectes

Tot i que el 25% de la població mundial menja regularment insectes, a Europa, això és només al voltant del 0,1%. Per a que a Europa pugui haver un creixement ràpid en l'ús d'insectes, es necessària l'aprovació ràpida per comercialitzar insectes com a aliment mitjançant el Reglament de nous aliments (258/97 CE). En els propers cinc anys s'espera que les tendències siguin la incorporació d'insectes en aliments, com en productes de fleca i en anàlegs de carn. Des del 2020, el cuc groc de la farina (larva de *Tenebrio molitor*) ha estat la primera espècie considerada segura per menjar com a novel food a la UE i al llarg d'aquest treball es mostra com s'aplica a la impressió 3D d'aliments.

La literatura disponible sobre els perills per a la seguretat alimentària dels insectes de consum humà ha augmentat en l'última dècada. Els factors que influeixen en la seguretat alimentària són el mètode de producció (collit o criat en estat salvatge), així com l'acumulació de contaminants, el tipus d'insecte i l'etapa de vida, i les condicions del substrat.

Diversos documents indiquen que en insectes s'han detectat metalls pesants com el cadmi, l'arsènic, el mercuri i el plom.

Un altre perill és la presència de bacteris patògens en els insectes. (Skotnicka et al., 2021) van demostrar la presència de bacteris patògens, paràsits i prions en insectes. Tanmateix, els autors expliquen que amb una gestió adequada de la granja d'insectes, els insectes podrien romandre lliures de patògens.

Finalment, el potencial al·lèrgic dels insectes també és un factor molt important que cal tractar. L'EFSA va remarcar el risc de reaccions al·lèrgiques a les proteïnes del cuc de la farina, especialment en persones que ja tinguin al·lèrgia preexistent als crustacis i àcars de la pols.

5.3 Proteïnes unicel·lulars

Les proteïnes unicel·lulars (SCP) es deriven de fongs, microalgues, llevats o bacteris. Per exemple, Quorn. Hi ha una investigació limitada sobre els possibles efectes al·lèrgics i tòxics dels SCP i, en conseqüència, la seguretat d'alguns SCPs és encara desconeguda (Hashempour-Baltork et al., 2019). Els perills per a la seguretat alimentària relacionats amb els SCP inclouen la presència de toxines, al·lèrgens i metalls pesants. Es va trobar que factors com el tipus d'alga, les condicions de cultiu, collita i el processament posterior, entre d'altres, influeixen en la presència de perills a les algues (van der Fels-Klerx et al., 2020). La literatura recent mostra que l'arsènic (inorgànic), el cadmi, el plom, el mercuri, bacteris patògens com *Salmonella spp.*, *Bacillus spp.*, *Vibrio spp.* i norovirus són perills rellevants en les algues (van der Fels-Klerx et al., 2020). Aquests resultats coincideixen amb un anàlisi de l'EFSA on es va trobar que les algues marines poden ser una font d'exposició augmentada a l'arsènic inorgànic, el cadmi, el plom, el mercuri i el iode.

5.4 Seguretat de les impressores 3D

La seguretat dels aliments impresos en 3D està també relacionada amb el contacte entre les parts de les impressores 3D i els ingredients alimentaris.

Abans de l'extrusió, la majoria dels materials alimentaris s'han d'escalfar per crear una pasta mal·leable adequada per passar pel broquet d'extrusió. En canvi, després de la impressió, l'estructura dels aliments s'ha de refredar per augmentar la seva resistència mecànica. Les operacions de calefacció i refrigeració poden fer que els aliments siguin més susceptibles al creixement microbià. En un estudi sobre batuts impresos, Severini et al. va trobar una càrrega microbiana de 4,28 Log CFU/g, cosa que suggereix la necessitat de desinfectar, abans de la impressió, cada part de les impressores 3D que entren en contacte amb els aliments. Les parts d'una impressora 3D en contacte amb els aliments han de tenir els requisits següents: ser segures en condicions normals d'ús, duradores, resistents a la corrosió, no absorbents, accessibles per a la inspecció, tenir superfícies fàcils de netejar i no tenir angles interns aguts. Per tal de reduir el risc de migració de partícules i creixement de bacteris, és recomanable recobrir les peces impreses en 3D amb resines epoxi o poliuretà de grau alimentari per segellar les seves superfícies (Baiano, 2022).

6 Optimització de la imprimibilitat

Un dels reptes al que cal afrontar-se en la impressió 3D d'aliments, és que alguns materials alimentaris no són adequats per a la impressió 3D, degut a que la seva estabilitat estructural és feble, és a dir, és difícil que pugin aguantar la geometria, l'altura i l'estabilitat conforme es van dipositant les capes de tinta.

En aquest treball es revisen les propietats reològiques que han de tenir les matèries primeres utilitzades durant la impressió 3D basada en extrusió, amb l'objectiu de millorar el rendiment d'impressió i la capacitat d'autosuport de la massa. A part, quan és dissenya un experiment d'impressió 3D, també s'han de tenir en compte els paràmetres d'impressió per a augmentar la precisió i la qualitat d'impressió.

Per a que els materials siguin aptes per a la impressió basada en extrusió han de ser fluids pseudoplàstics. Els fluids pseudoplàstics són fluids no newtonians que disminueixen la seva viscositat en augmentar la velocitat de deformació

aplicada. A part el material ha de poder ser extruït fàcilment pel broquet de la impressora i ha de ser capaç de solidificar-se després de l'extrusió per a mantenir la forma (Jiang et al., 2019).

6.1 Propietats reològiques

És essencial conèixer les propietats reològiques dels materials per tal de predir si la impressora pot imprimir el material o col·lapsarà en imprimir. Les propietats reològiques que s'han de tenir en compte són les següents:

- **Tensió de fluència (t_0):** Resistència de la massa impresa contra el col·lapse per gravetat i la deposició d'una altra capa sobre ella.
- **El mòdul d'emmagatzematge, G' :** S'utilitza per predir la resistència mecànica. Les mescles amb prou resistència mecànica poden suportar la forma impresa amb el pas del temps amb bona resolució. Descriu el comportament elàstic o sòlid.
- **El mòdul de pèrdua, G'' :** La G'' està relacionada amb característiques viscoses o líquides.
- **Tangent de pèrdua mecànica dinàmica, $\tan(\delta)$:** Si ($\tan \delta = G''/G'$) dona un valor més petit que 1 significa un comportament predominantment elàstic. En canvi, si dona un valor més gran que 1 indica un comportament predominantment viscos. Un valor de $\tan \delta$ elevat indica que el material mostra més fluïdesa i un valor $\tan \delta$ baix significa un comportament més semblant al sòlid amb poca fluïdesa.
- **Viscositat aparent, η :** Ha de ser prou baixa per permetre un procés d'extrusió fàcil i prou alta com per adherir-se a les capes dipositades anteriorment i aguantar el pes d'aquestes. Els materials d'alta viscositat poden bloquejar la sortida del broquet, enganxant-se a les parets de l'extrusora.

Per aconseguir materials amb les propietats reològiques desitjades per a la impressió, es poden utilitzar modificadors reològics, per exemple, hidrocol·loides (goma xantana, gelatina, agar, midó...) o enzims (transglutaminassa), dins dels estàndards de seguretat alimentària.

6.2 Paràmetres d'impressió

Durant el procés d'impressió els paràmetres d'impressió poden induir canvis en les estructures impreses. Aquests inclouen:

- **Diàmetre del broquet (mm):** La mida del broquet afecta a la precisió d'impressió i la rugositat superficial dels productes. La resolució dimensional i la qualitat superficial de la mostra milloren amb la disminució de la mida del broquet. Com més petit sigui el diàmetre del filtre, més gran serà la qualitat de la mostra. No obstant això, una disminució del diàmetre del filtre no només augmenta el temps d'impressió, sinó que també augmenta la pressió. Una pressió excessiva pot provocar la sobrecàrrega del dispositiu d'impressió 3D.
- **Alçada de broquet (mm):** Distància entre la punta del broquet de l'extrusora i la capa superior dipositada.
- **Velocitat de moviment del broquet (mm/s):** La velocitat a la què es mou el capçal té molta incidència en la capacitat de producció de la màquina i la qualitat d'extrusió. Si un motor pot moure el capçal a 20 mm/s durant la deposició de material, l'extrusor ha d'expulsar la quantitat requerida de material, en un temps determinat. Per tant, la velocitat de moviment del broquet i el cabal volumètric d'extrusió són determinants per a la qualitat d'extrusió.
- **Cabal volumètric d'extrusió (mm³/s):** Volum de tinta d'extrusió que passa pel broquet en un temps determinat. Si el cabal volumètric és menor que la velocitat de moviment del broquet, hi haurà zones del material extruït on no hi haurà tinta. Tal i com podem observar a l'estudi (Yang et al., 2018a).
- **Velocitat d'impressió (mm/s):** Controlar la velocitat de la impressora 3D implica controlar la velocitat de les coordenades X, Y, Z, la velocitat de l'eix X (moviment del motor de l'extrusora horitzontalment), velocitat de l'eix Y (moviment del llit d'impressió), velocitat de l'eix Z (desplaçament del motor de l'extrusora amb la xeringa cap amunt o verticalment) (Dankar et al., 2018).
- **Temperatura (°C):** Cada material té un rang de temperatures a la què pot ser extruït. La temperatura d'extrusió afecta la fluïdesa del material. Hi ha

estudis que es presenten en aquest treball que han hagut de fer proves anteriors per a avaluar si el material s'extrudeix millor a temperatura ambient o si és necessari augmentar la temperatura.

Per tant, cal optimitzar els paràmetres implicats en el procés d'impressió, per tal d'obtenir el resultat desitjat. La impressora s'ha de controlar mitjançant un ordinador o un sistema de control connectat a la impressora. D'aquesta forma es poden ajustar paràmetres com el capçal d'impressió en els eixos X, Y i Z, el diàmetre del broquet, l'alçada del broquet, la velocitat del broquet... per obtenir bons resultats.

A continuació, anem a veure un exemple sobre com optimitzar aquests paràmetres en un procés experimental:

(L. Wang et al., 2018) van investigar la influència de l'addició de NaCl en les propietats reològiques del gel de surimi per utilitzar-lo com a material per a la impressió 3D.

La gelificació del surimi es produeix per la desnaturalització de les proteïnes i la posterior agregació d'aquestes (Cando et al., 2015). El clorur de sodi s'utilitza habitualment per solubilitzar les proteïnes miofibril·lars i per induir el desplegament de la proteïna.

En aquest treball es van avaluar diferents valors per als següents paràmetres, amb l'objectiu d'aconseguir el millor comportament d'extrusió i la millor qualitat de les construccions 3D:

Taula 3 Paràmetres d'impressió avaluats en l'estudi (L. Wang et al., 2018).

Paràmetres d'impressió				
Diàmetre broquet	0,8 mm	1,5 mm	2 mm	
Alçada broquet	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm
Velocitat de moviment del broquet	20 mm/s	24 mm/s	28 mm/s	32 mm/s
Velocitat d'extrusió	0,002 cm ³ /s	0,003 cm ³ /s	0,004 cm ³ /s	0,005 cm ³ /s

I també es van avaluar les següents concentracions de NaCl: 0, 0.5, 1.0, 1.5g/100 g.

Com a matèria primera per a fer la tinta s'utilitza un filet de carpa platejada fresca. El filet de peix es pica amb una picadora mecànica. A continuació, es renta el peix picat i és centrifugat. El surimi picat, net i centrifugat es barreja amb les diferents concentracions de NaCl.

Es va observar que la viscositat disminueix amb l'augment de la velocitat de cisalla. Això va indicar que els gels de surimi són fluids pseudoplàstics i presenten un aprimament per cisalla. Recordem que l'aprimament per cisalla és el comportament no newtonià dels fluids la viscositat dels quals disminueix sota la tensió de cisalla, ideal per a la impressió 3D.

Per a totes les mostres, el mòdul d'emmagatzematge (G') és superior al mòdul de pèrdua (G''), per tant, $\tan \delta$ (G''/G') és menor que 1, cosa que mostra el potencial de la matèria primera per formar un gel elàstic.

L'addició creixent de NaCl va millorar la força del gel. A la concentració més alta de NaCl (1,5 g/100 g), la força del gel va arribar a 7,20 N, el que representa un augment d'unes 2,0 vegades en comparació amb la del control. Això es deu principalment a la inflamació de la proteïna miofibril·lar.

La capacitat de retenció d'aigua (WHC) en gels de surimi depèn principalment dels llocs d'interacció proteïna-aigua. WHC dels gels de surimi va augmentar significativament amb l'addició de NaCl creixent, això va indicar que el NaCl millora la capacitat de retenció d'aigua per part de la xarxa de gel. Els ions clorur s'uneixen a proteïnes miofibril·lars i augmenten la repulsió electrostàtica entre filaments, augmentant així l'afinitat de la proteïna per l'aigua. Això va donar una millor formació de xarxa de gel. Una xarxa ben definida, una força de gel prou alta i una viscositat adequada dels materials van ser fonamentals per suportar el pes de les capes posteriorment dipositades en forma 3D (Godoi et al., 2016).

Els gels de surimi control amb alta viscositat, no es van poder extreure de manera suau. En canvi, amb una addició de NaCl de 1,5 g/100 g, les construccions impreses van mostrar una textura superficial més suau, una millor coincidència amb la geometria objectiu, menys defectes i sense deformacions. A partir

d'aquestes observacions, es va determinar que la concentració òptima era d'1,5 g/100 g.

El diàmetre òptim del broquet va resultar ser de 2,0 mm. Diàmetres més baixos van donar models pobres i inconsistents. Mentre que quan el diàmetre del broquet va ser de 2,0 mm, tant la resolució dimensional com la qualitat superficial de la mostra impresa final van ser les millors. L'alçada del broquet de 5,0 mm va ser la òptima per proporcionar una bona unió entre les capes per mantenir la geometria adequada.

Una velocitat massa alta (32 mm/s) va provocar l'arrossegament dels filaments extruïts dels productes provocant la ruptura dels filaments extruïts. Tot i que a velocitats de moviment molt baixes es van formar bobines. Per tant, la velocitat adequada de moviment del broquet va ser de 28 mm/s.

Amb aquest estudi, per tant, s'ha pogut observar la importància dels paràmetres d'impressió i les propietats reològiques del material alimentari. Podem concloure, que de vegades és necessària una ajuda per a fer el material més extruïble, en aquest cas ha estat la sal, però el més comú és usar hidrocol·loides i enzims, com veurem més endavant.

7 Ingredients per al desenvolupament de productes 3D

Aquest treball de fi de grau és centra en l'ús de proteïnes alternatives com a matèries primeres. En la majoria de vegades, per a que aquestes proteïnes alternatives puguin constituir una tinta imprimible amb les propietats reològiques apropiades (que puguin fluir perfectament pel broquet, que tinguin una viscositat adequada per a suportar les capes que es dipositen posteriorment, etc) es necessiten additius, com per exemple els texturitzants. A més, un gran nombre d'investigacions han afegit probiòtics, enzims, compostos funcionals i fins i tot fàrmacs per tal de personalitzar el disseny dels productes impresos.

A més, el post processament d'aliments impresos en 3D, inclosos el fregit, la cocció i la congelació, és un procés que també fa necessari l'ús d'additius i enzims.

Per tant, en aquest apartat es resumeixen múltiples investigacions per a mostrar la diversitat d'ingredients i additius que s'han usat en la impressió 3D, a part d'avaluar la proteïna alternativa com a ingredient principal.

Mirant exemples d'estudis anteriors es pot treure una conclusió de com es pot optimitzar el disseny de les receptes i el procés d'impressió.

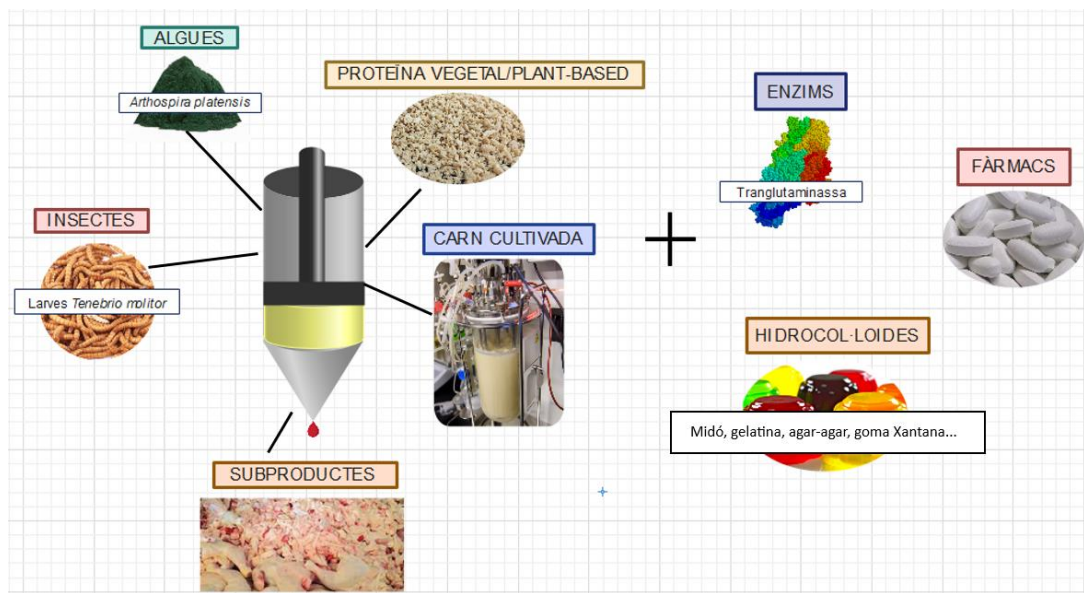


Fig. 8 Esquema de les proteïnes alternatives que es poden usar en la impressió 3D, juntament amb alguns additius que ajuden a fer el producte més extruïble (enzims, hidrocol·loides...) i substàncies que ajuden a augmentar el valor nutricional del producte. Imatge de creació pròpia.

7.1 Texturitzants

Els texturitzants ajuden a fer que les tintes alimentàries siguin adequades per a la impressió.

7.1.1 Hidrocol·loides

(Kim et al., 2018) van investigar l'efecte dels hidrocol·loides sobre les propietats reològiques i la imprimibilitat. Es van usar tres pols vegetals diferents: bròquil, fulles d'espínacs i pastanagues i es van caracteritzar 4 hidrocol·loides per a correlacionar la viscositat i la capacitat de retenció d'aigua (WHC) amb propietats reològiques i la qualitat d'impressió.

Les verdures contenen quantitats importants de substàncies bioactives que aporten beneficis per a la salut. No obstant això, les verdures no es poden usar directament com a tintes alimentàries, pel seu alt contingut en aigua i pel seu

baix contingut en hidrats de carboni, greixos i proteïnes. Els estudis que usen materials vegetals imprimibles són escassos.

Els hidrocol·loides que es van usar són els següents:

- Hidroxipropil metilcel·lulosa (HPMC)
- Goma de garrofa (LBG)
- Goma xantana (XG)
- Goma guar (GG)

La mida de partícules de les 3 pols vegetals es van ajustar de 100 a 150 μm fent passar la pols a través de garbells amb mides de malla de 100 μm i 150 μm , d'aquesta manera no es col·lapsa el broquet. Per a la formulació de la tinta, les pols vegetals liofilitzades es van afegir a les mescles d'hidrocol·loides i es van agitar fins a obtenir una mescla homogènia. Les pols vegetals es van afegir a concentracions del 10 i 30% (p/p). Altres ingredients que es van afegir a la formulació van ser la sacarosa, NaCl i l'àcid acètic que va actuar com antioxidant.

Taula 4 Paràmetres d'impressió usats a l'estudi (Kim et al., 2018).

Paràmetres d'impressió	
Diàmetre broquet	1,6 mm
Alçada del broquet	0,9 mm
Cabal volumètric d'extrusió	20 mm/s

En les mostres que contenien un 10% de XG, GG i LBG, els valors de G' eren superiors als valors de G'' , cosa que indica que aquests materials presentaven unes propietats semblants a les d'un gel. En canvi, a les mostres que contenien HPMC, els valors de G' eren inferiors als valors de G'' el que significa que les mescles d'HPMC mostraven propietats semblants a les d'un líquid. Per tant, es va deduir que les mescles que contenien un 10% de HPMC serien insuficients per suportar la deposició de múltiples capes. Les mescles d'hidrocol·loides amb el contingut vegetal del 30% tenien valors de G' i G'' significativament més alts. La reologia i la imprimibilitat de totes les mescles (excepte les basades en XG) variaven en funció del tipus de pols vegetal usada, la variació augmentava conforme augmentava el contingut de pols. Les mescles basades en XG, en canvi, no van mostrar diferències en la reologia i la imprimibilitat entre les pols

vegetals, els objectes impresos van mostrar bons resultats d'extrusió i alta resolució, sense esquerdes a les capes. Aquest estudi va concloure que XG era l'hidrocol·loide òptim per a la preparació de tintes que contenen un volum gran de pols, el que permetia augmentar el valor nutricional. La goma xantana, l'hidrocol·loide d'aquest estudi amb major capacitat d'hidratació de l'aigua, va inhibir la inflamació de les partícules, minimitzant així l'augment dels valors reològics a fraccions de pols de gran volum i reduint les diferències d'imprimibilitat entre diferents fonts vegetals.

7.1.2 Midó de patata

(Yang et al., 2018a) va desenvolupar una nova construcció d'aliments d'impressió en 3D basada en un sistema de gel de suc de llimona. Com hem dit anteriorment es poden utilitzar modificadors reològics per tal d'aconseguir unes propietats reològiques desitjades per a la impressió, així que en aquest estudi es va usar midó de patata com additiu per a fer que el suc de llimona pugues ser extruït. Van investigar l'efecte del midó de patata en les següents quantitats: 10, 12.5, 15, 17.5 i 20 g/100 g. En aquesta investigació es va triar el midó com a agent gelificant.

Els paràmetres òptims per imprimir construccions 3D que coincidien amb la geometria objectiu amb una resolució fina i una textura superficial més llisa van ser els següents:

Taula 5 Paràmetres d'impressió òptims per a l'estudi (Yang et al., 2018a)

Paràmetres d'impressió	
Diàmetre del broquet	1 mm
Alçada del broquet	1 mm
Cabal volumètric d'extrusió	24 mm ³ /s
Velocitat de moviment del broquet	30 mm/s

Primer es va barrejar suc de llimona amb els diferents continguts de midó. Posteriorment, la mescla es va homogeneïtzar completament mitjançant una batedora. Finalment, la mostra es va refredar a temperatura ambient per formar una estructura semblant a un gel i es va emmagatzemar a 4 ° C.

Els gels de suc de llimona són fluids pseudoplàstics perquè com ja hem vist anteriorment, la viscositat aparent del gel de suc de llimona es redueix amb l'augment de la velocitat de cisalla, cosa que és beneficiosa per extruir la tinta a través del broquet. L'augment del contingut de midó de patata va provocar un augment general de la viscositat, i això és beneficiós per a la conservació de la forma del material extruït.

Tenint en compte les propietats viscoelàstiques del gel de suc de llimona, G' sempre va ser superior a G'' . Com a paràmetre característic s'utilitza la tangent de pèrdua ($\tan \delta = G''/G'$). Si G' és un valor superior a G'' significa que el valor de $\tan \delta$ serà més petit que 1, per tant, el gel de suc de llimona té una propietat predominantment elàstica.

Un alt contingut de midó (17.5 i 20 g/100 g) va donar lloc a un material inadequat, amb una alta viscositat i una $\tan \delta$ molt petita, per tant el material va revelar un comportament més sòlid i una fluïdesa deficient, donant lloc a una dificultat d'extrusió.

Mentre que un baix contingut de midó (10, 12.5 g/100 g) va conduir a un material amb viscositat molt baixa i una gran resistència. El material va revelar un comportament semblant al líquid i amb molta fluïdesa, donant lloc a una quantitat d'extrusió més gran que el valor establert.

Amb l'addició de midó de patata a 15 g/100 g, les construccions impreses van mostrar la textura superficial visual més suau, i que millor coincideix amb la geometria objectiu, menys defectes puntuals i sense deformació. A partir d'aquestes observacions, es va determinar que la concentració òptima era de 15 g/100 g de midó.

Els resultats d'aquest estudi van mostrar que el cabal volumètric d'extrusió i la velocitat de moviment del filtre han de coordinar-se ja que afecten la impressió 3D simultàniament. Si el cabal volumètric d'extrusió és elevat i la velocitat de moviment del filtre és menor, es produirà una acumulació del producte que produirà línies ondulades de major diàmetre (figura 9.B). Quan el cabal volumètric d'extrusió del material és tan lenta que la velocitat de moviment del filtre és més gran, la baixa pressió d'alimentació i el baix cabal provocaran que hagi zones sense tinta (fig 9.A) (Yang et al., 2018).



Fig. 9 Adaptació de (Yang et al., 2018b). Simulació de gel de suc de llimona.

Si el cabal volumètric d'extrusió i la velocitat d'extrusió del material és dins d'un rang de coincidència adequat, la linealitat d'extrusió és una línia recta suau.

7.2 Aplicació de la proteïna alternativa a la impressió 3D

7.2.1 Proteïnes vegetals

En l'estudi (Qiu et al., 2023) es van investigar les propietats reològiques i el rendiment d'impressió de tintes comestibles produïdes a partir de proteïna de soja (SPI), gluten de blat (WG) i proteïna d'arròs (RP). L'objectiu era barrejar pols SPI, WG i RP per desenvolupar una tinta comestible alta en proteïnes (25% del contingut total de matèria seca) que es pugui utilitzar per crear substituents de carn impresos en 3D.

Aquestes tintes enriquides amb proteïnes presentaven un comportament pseudoplàstic amb propietats viscoelàstiques. La viscositat aparent i el mòdul d'emmagatzematge (G') d'aquestes pastes van disminuir amb l'augment de la proporció de proteïnes de l'arròs, la qual cosa va millorar el seu rendiment d'impressió 3D, com ara la duresa i la força de suport.

Els experiments preliminars d'aquest estudi van demostrar que les pastes fetes d'aquestes dues proteïnes (SPI i WG) no eren adequades per crear anàlegs de carn mitjançant la impressió 3D perquè eren massa dures i elàstiques. Van plantejar la hipòtesi de que es podrien produir tintes millors substituint algunes de les proteïnes de soja i blat per proteïnes d'arròs (RP). A més, la proteïna de l'arròs pot proporcionar beneficis nutricionals addicionals en subministrar aminoàcids essencials, com la metionina i la cisteïna. Per aquest motiu, van avaluar pastes de proteïnes mixtes (SPI, WG i RP), per aconseguir la quantitat òptima de proteïna d'arròs necessària per crear tintes comestibles amb les propietats reològiques adequades per a una impressió amb èxit, com ara l'aprimament i la viscoelasticitat.

Les tintes d'impressió (pastes SPI-WG-RP) es van barrejar amb aquestes proporcions de massa d'1:1:0.0, 1:1:0.4, 1:1:0.7 i 1:1:1.0, respectivament. Aquestes mostres es van denominar RP (0,0), RP (0,4), RP (0,7) i RP (1,0), respectivament.

Les tintes comestibles es van imprimir mitjançant una impressora 3D basada en extrusió. Els paràmetres d'impressió van ser els següents:

Taula 6 Paràmetres d'impressió òptims per a l'estudi (Qiu et al., 2023)

Paràmetres d'impressió	
Diàmetre del broquet	0,84 mm
Velocitat de moviment del broquet	20 mm/s
Alçada del broquet	0,84 mm

En aquest estudi, es va comparar la impressió sense escalfar a temperatura ambient (25°C) i la impressió escalfada per aire a diferents temperatures (200~500°C), que es van ajustar pel controlador de temperatura de la impressora. Tant la impressió sense escalfar com l'escalfada podrien crear materials semisòlids, però escalfant els materials semblaven ser més adequats per produir materials amb propietats semblants a la carn, és a dir, materials fibrosos i resistents.

Com hem vist anteriorment, la fluïdesa de les tintes comestibles és un factor crític per al rendiment d'impressió 3D, ja que les tintes han de poder fluir a través del broquet sense bloquejar-lo, alhora que les tintes han de tenir una resistència mecànica prou alta per suportar el seu pes un cop es dipositen a la superfície d'impressió.

En aquest estudi, la viscositat aparent de cisalla de totes les tintes va disminuir a mesura que augmentava la velocitat de cisalla, la qual cosa indicava que aquestes pastes presentaven un comportament d'aprimament per cisalla, ideal per a la impressió 3D.

L'augment de la proporció de proteïnes de l'arròs va disminuir la viscositat aparent de les pastes, cosa que va facilitar la seva extrusió a través del broquet

durant la impressió 3D. La capacitat de les proteïnes de l'arròs per millorar el rendiment d'impressió pot haver estat degut a la seva capacitat per afeblir les interaccions entre les proteïnes de soja i de blat, disminuint així la viscositat aparent.

Els valors de $\tan \delta$ per a totes les mostres de pasta de proteïnes eren inferiors a 1, com hem vist, això significa que $G' > G''$, cosa que indica que les mostres presentaven propietats predominantment elàstiques.

En conclusió, aquest treball aconsegueix fer substituïts de carn alts en proteïna sense afegir cap additiu, però mitjançant la substitució de proteïnes. La incorporació de proteïna d'arròs a les pastes de proteïnes mixtes va reduir la seva viscositat i mòdul de cisalla, així com alterant la distribució de l'aigua.

7.2.2 Microalgues

La biomassa microalgal és un ingredient funcional prometedor pels seus beneficis per a la salut donats per la seva composició (proteïnes, minerals, vitamines, pigments, àcids grassos, esterols i antioxidants). Les microalgues es poden utilitzar per produir aliments d'alta qualitat amb una composició química ben equilibrada i valor nutricional excel·lent. No obstant això, a la pràctica, el nivell d'incorporació de microalgues en molts productes és difícil. L'objectiu de l'estudi (M. Wang et al., 2023) era desenvolupar un nou material d'impressió 3D a base de residus d'*Spirulina platensis* amb característiques d'aprimament per cisalla, i una ràpida recuperació.

Spirulina platensis és rica en nutrients essencials i la composició és relativament equilibrada. Tanmateix, la majoria d'aquests aliments saludables es prenen en forma de pols i comprimits, i hi ha poques altres formes.

Spirulina platensis conté ficocianina, que és un compost actiu típic de microalgues amb efectes antioxidants i antiinflamatoris. Els polisacàrids existents a *Spirulina platensis*, a més de les funcions antibacterianes i antioxidants, s'ha demostrat que milloren l'obesitat mitjançant la regulació de la flora intestinal i el metabolisme dels lípids (Guo et al., 2021). Després d'extreure la ficocianina i els polisacàrids, els residus de *Spirulina platensis* encara contenen molta proteïna insoluble, polisacàrid insoluble i fibra dietètica. Tanmateix, aquests residus s'acostumaven a rebutjar, provocant un malbaratament de recursos. Atès que

Spirulina platensis ha estat aprovada com a matèria primera alimentària, és de gran importància estudiar l'aplicació dels residus de *Spirulina platensis* als aliments.

Tenint en compte l'esmentat anteriorment, aquest estudi pretenia desenvolupar una tinta alimentària 3D basada en residus d'*Spirulina platensis*.

Els residus de *Spirulina platensis* després de l'extracció de ficocianina es van marcar com a R₁. Els residus després de l'extracció de polisacàrids van ser etiquetats amb R₂.

Es va utilitzar una impressora 3D basada en extrusió amb els següents paràmetres d'impressió:

Taula 7 Paràmetres d'impressió òptims per a l'estudi (M. Wang et al., 2023).

Paràmetres d'impressió	
Diàmetre del broquet	2mm
Alçada del broquet	1mm
Velocitat de moviment del broquet	20mm/s

Els residus contenen sis tipus d'aminoàcids essencials (incloent tirosina, valina, fenilalanina, isoleucina, leucina i lisina), això demostra que en el procés d'extracció no es destrueixen els aminoàcids essencials.

L'efecte d'impressió 3D dels materials es quantifica per la resolució de les capes impreses i pel grau de manteniment de la forma impresa. Per estudiar els efectes del contingut d'humitat sobre el rendiment de la impressió 3D, es van utilitzar dos tipus (R1 i R2) i quatre relacions d'humitat (20%, 25%, 30,9% i 35%) per a l'avaluació de la impressió. Quan el contingut d'humitat del grup R₁ era del 20%, la mostra es podia imprimir i tenia l'alta viscositat i resistència mecànica requerides per a l'autosuport, però, el baix contingut d'humitat va provocar un bloqueig de broquet durant la impressió, la impressió no es va poder completar. En canvi, quan el contingut d'humitat es va augmentar al 25%, el rendiment d'impressió va ser el millor del grup R₁, l'extrusió de tinta de residus de *Spirulina platensis* va ser suau, l'estabilitat de l'estructura va ser forta després de l'extrusió.

Tanmateix, amb l'augment del contingut d'humitat, la fluïdesa de la tinta de residus de *Spirulina platensis* era massa gran per mantenir l'estabilitat estructural i l'estructura de la mostra es va col·lapsar després de la impressió. La impressió es pot dur a terme amb èxit amb un contingut d'humitat del 20%, 25% i 30% al grup R₂.

Per tant, el grup R₂ va mostrar una millor imprimibilitat que el grup R₁ amb el mateix contingut d'humitat.

La G' de totes les mostres era superior a la G'' en tots els rangs de freqüència estudiats, la qual cosa va indicar que els residus de *Spirulina platensis* tenien un comportament similar a l'elasticitat sòlida.

La tan δ de la tinta de residus de *Spirulina platensis* era <1 , cosa que indica que el comportament elàstic era fort, això pot ser degut a la presència de més proteïnes en els residus de *Spirulina platensis*.

En aquest estudi, amb l'augment de la velocitat de cisalla, la viscositat dels residus va baixar bruscament, la qual cosa va indicar que tots els residus d'*Spirulina platensis* eren fluids no newtonians, pseudoplastics.

En l'estudi (Uribe-Wandurraga et al., 2020), van avaluar la impressió d'aperitius de cereals que tenien incorporades les microalgues *Chlorella vulgaris* i *Arthrospira platensis*. En primer lloc, es va estudiar l'efecte de la introducció de les microalgues tant en les propietats reològiques com en la imprimibilitat de la massa. L'addició de microalgues va millorar la imprimibilitat de la massa mitjançant la impressió 3D basada en l'extrusió.

Chlorella vulgaris (Chlorella) i *Arthrospira platensis* (Espirulina) són dues de les espècies de microalgues més conegudes. La chlorella és un organisme unicel·lular i l'espirulina és un cianobacteri multicel·lular filamentós. Tots dos produeixen compostos bioactius com proteïnes, minerals, vitamines, pigments, àcids grassos poliinsaturats de cadena llarga, esterols i antioxidants. (Lidiane M Andrade, 2019). L'addició de biomassa de microalgues no s'ha investigat a fons per fabricar aliments impresos en 3D. Malgrat el seu alt valor nutricional, un dels principals factors que limiten l'aplicació de microalgues en productes de forn a

base de blat és el color verd fort que deixen en l'aliment i que generalment els consumidors no associen als productes alimentaris al forn.

La farina de blat a la recepta original de la massa es va substituir parcialment per diferents nivells de biomassa de microalgues liofilitzades. Es van formular dos tipus diferents de massa substituint la farina de blat de pastisseria amb diferents nivells (1, 2, 3 i 4%) de biomassa de microalgues liofilitzades i també es va preparar una massa control sense addició de microalgues.

Els valors d'activitat d'aigua (a_w) de les mostres de pasta estaven entre 0,89 i 0,93. En comparació amb la massa control, l'activitat de l'aigua disminueix lleugerament en mostres amb espirulina i clorella afegida. Això indica que l'addició de microalgues redueix la capacitat d'absorció d'aigua a causa de la capacitat de competir per l'aigua amb altres constituents (proteïnes, fibres, lípids) al sistema de pasta.

La viscositat de les masses va disminuir amb l'augment de la velocitat de cisalla per a totes les mostres, cosa que indica que les masses produïdes en aquest estudi són fluids pseudoplàstics. Les masses enriquides amb Espirulina van presentar valors η més alts, en comparació amb les mostres de control i de Clorella.

El mòdul elàstic (G') va ser superior al mòdul viscos (G'') en masses enriquides amb Espirulina i Chlorella, per tant les mostres amb microalgues tenien una tan δ significativament més baixa, cosa que indica un major comportament elàstic.

L'addició de biomassa de microalgues va contribuir a un augment significatiu del mòdul de cisalla de les masses. Totes les mostres van mostrar que el mòdul de cisalla augmentava significativament quan s'afegia un 4% de microalgues. Aquest augment del mòdul de cisalla indica que la incorporació de microalgues millorava significativament la retenció de la forma després de la deposició.

En conclusió, l'addició de microalgues va canviar propietats fent que les masses mostressin un comportament reològic i viscoelàstic adequat per al procés d'impressió.

7.2.3 Insectes

(Severini, Azzollini, et al., 2018) van emprar la tecnologia d'impressió 3D per obtenir aperitius amb una geometria cilíndrica dissenyada a partir de massa de farina de blat enriquida amb larves moltes de cucs grocs de farina (*Tenebrio molitor*) com a nova font de proteïnes. A més, es va comparar el valor nutricional, la digestibilitat de les proteïnes i el perfil d'aminoàcids entre els aperitius obtinguts a diferents nivells de substitució.

Les larves de cucs de farina grocs es van triturar a 6000 rpm en un molí per passar per un tamís de 900 µm, per tal de no obstruir el broquet. Es van formular tres barreges de farina de blat i pols de cuc de farina en proporcions de massa de 100:0, 90:10 i 80:20. Es van realitzar un total de 15 experiments per triplicat.

Taula 8 Paràmetres d'impressió òptims per a l'estudi (Severini, Azzollini, et al., 2018).

Paràmetres d'impressió	
Diàmetre broquet	0,84mm
Alçada del broquet	22mm
Velocitat d'impressió	30mm/s

Si es compara la composició nutricional de la pols de larves i de la farina de blat, el contingut mitjà de proteïnes a la pols de larves va ser de 54,2g/100g, significativament superior als 11,7g/100g que es troben a la farina de blat. Per tant, quan es va enriquir la farina de blat amb pols de larves al 10% i al 20%, el contingut de proteïnes va augmentar fins a 15,9g/100g i 20,4g/100g, respectivament. El contingut de lípids de les barreges va augmentar d'1,1 a 3,4 i 5,6 g/100 g.

La capacitat d'absorció d'aigua va disminuir significativament amb l'augment del contingut d'insectes. Aquest efecte podria ser degut a la presència de compostos hidrofòbics com els àcids grassos en els cucs de la farina molts o a la reducció

del contingut de midó i gluten, ja que aquests tenen una gran capacitat d'absorció.

Es van coure els aperitius impresos en 3D a 200°C durant 22 minuts. La cocció no va alterar l'aspecte visual general dels aperitius, aquests van seguir mantenint una forma cilíndrica buida amb un quadrat al centre. No obstant això, sí que van haver canvis en les propietats dimensionals.

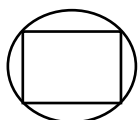


Fig. 10 Esquema representatiu de la geometria del producte.

Pel que fa al diàmetre de les mostres, es van observar importants reduccions després de la cocció (13,5%), els valor van passar de 16,9 mm en mostres crues fins a 15 mm per a mostres preparades al 0% d'insectes. Mentre que en aperitius formulats al 20% d'insectes, només va haver un 4,8% de reducció, de 18,7mm en mostres crues a 17,8 mm.

Els aperitius impresos van reproduir l'estructura general de l'objecte dissenyat amb suficient fidelitat. Tanmateix, l'addició de diferents nivells de larves moltes de cucs grocs de farina va modificar la imprimibilitat de la massa. La massa enriquida va ser més suau produint una sobre-deposició durant la impressió provocant un augment de diàmetre, del pes i una disminució de l'alçada dels aperitius crus.

En conclusió, es va observar una millora significativa del perfil d'aminoàcids de la farina de blat pura quan es van enriquir els snacks amb diferents nivells d'insectes molts, validant la promoció racional dels insectes a partir d'arguments nutricionals. Per tant, els resultats indiquen que juntament amb la farina de blat, el cuc de farina groc molt podria ser un ingredient adequat per fabricar aliments impresos en 3D amb una qualitat nutricional millorada

7.2.4 Carn in vitro o cultivada

Per cultivar carn en un laboratori, es recullen cèl·lules mare dels animals i s'afegeixen a un medi ric en nutrients on es multipliquen i creixen fins a convertir-se en teixit muscular. La carn cultivada té com a objectiu oferir una alternativa més respectuosa amb el medi ambient i amb els animals, sense renunciar al

sabor i la textura. Tot i les seves bones intencions, la producció actual de carn cultivada, encara s'enfronta a importants barreres tècniques, reguladores i financeres, per exemple, els costos de producció solen ser alts i és una tecnologia que necessita un consum energètic alt. La impressió en 3D d'estructures complexes com músculs, pell, ossos i cartílags amb biomaterials s'anomena bioimpressió. La impressió 3D de la carn de cultiu és molt complicada. La impressió 3D de la carn es compon principalment de les cèl·lules inicials, el medi de cultiu i la bastida. La bastida 3D és essencial per a l'estructura de la carn cultivada, la qual cosa determina la similitud fisiològica entre la carn cultivada i la carn real. Per tant, la bastida utilitzada en la impressió 3D ha de tenir una bona qualitat sensorial i seguretat alimentària i garantir la suficiència de la superfície i la porositat per suportar l'adhesió i la proliferació cel·lular. (Ben-Arye et al., 2020) va utilitzar proteïna de soja com a bastida 3D per donar suport a les cèl·lules i imitar teixit muscular boví, replicant així la sensació i la textura de la carn. El fibrinogen, la gelatina i el col·lagen són bastides d'impressió 3D que s'utilitzen sovint per millorar la rigidesa dels teixits.

7.3 Altres ingredients

7.3.1 Impressió 3D basada en subproductes de carn

L'ús de nous components que no s'utilitzen o no són populars entre els consumidors, com els subproductes de la indústria de processament d'aliments, representa un benefici addicional. Aquests productes, són visualment desagradables per al consum, però es poden utilitzar com a formulacions imprimibles, seguint els principis de la economia circular de disseny de residus, i reduint l'impacte negatiu de la carn de bestiar en el medi ambient. Els subproductes del bestiar, com els intestins, la pell, els peus i el greix, representen el 52% i el 66% del pes viu del bestiar. Atès que més de la meitat del pes viu d'aquests animals no s'aprofita, és important investigar com la tecnologia 3DPF pot utilitzar els subproductes de la carn per a donar-los una segona oportunitat. Tanmateix, la reutilització de subproductes per al consum també inclouen la percepció negativa del consumidor i una regulació molt més estricta.

Els residus industrials del peix també contenen biomaterials valuosos com ara quitosà, aminoàcids, enzims i gelatina, que es podrien explotar (Jayathilakan et al., 2012). El col·lagen també es pot derivar de la pell de peix, que es descarta

juntament amb altres parts (la cua, l'intestí, les aletes i el cap). En una investigació, el col·lagen extret de la pell d'anguila es va barrejar amb hidrogel d'alginat per formar construccions 3D rendibles i ecològiques (Govindharaj et al., 2019).

En cas de que s'usi carn crua perquè s'han aprofitat els residus i els malbarataments de carn, aquesta s'ha de triturar fins aconseguir una pasta, per tal d'optimitzar la mida de les partícules amb l'objectiu d'aconseguir una extrusió suau sense obstrucció. Per a aconseguir-ho s'ha de fer que la mida de les partícules dels ingredients sigui més petita que la mida del broquet de la impressora. Per millorar la imprimibilitat, també es poden incloure additius.

7.4 Ingredients que permeten un millor post procesament

S'han utilitzat diversos materials per a la impressió d'aliments. No obstant això, la majoria d'aquests materials no són adequats per a les tècniques tradicionals de processament d'aliments (cocció, ebullició, fregit, etc.). Un dels reptes que encara s'ha de superar és que el material alimentari sigui compatible amb les tècniques de cuina tradicionals com ara la planxa, la cocció al forn o el fregit (Lipton et al., 2010a).

Durant la cocció, els aliments estan sotmesos a alts nivells de calor que estimulen moltes reaccions químiques com la desnaturalització de proteïnes, la pèrdua i l'evaporació d'aigua, el canvi de color, volum i valor nutricional. (J. Lipton et al., 2010b) van usar dos tipus d'additius per a convertir les tintes alimentaries en material apte per coure, rostir i fregir, la transglutaminassa i l'agar. En aquest estudi es van usar tres matèries primeres com a tintes: el gall dindi, vieires i l'api.

La transglutaminasa permet la construcció de geometries complexes a partir de carn i permet la cocció posterior. Es van seleccionar dos purés de carn candidats com a material de prova, les vieires i el gall dindi. Tots dos materials es van fer puré per a que poguessin ser extruïts pel broquet i es va afegir transglutaminasa als purés just abans d'imprimir. A continuació, les vieires es van fregir i el gall dindi es va cuinar amb el mètode Sous-vide. Sous-vide és un mètode de cocció en què els ingredients s'escalfen durant un període prolongat de temps a baixa temperatura. La transglutaminassa va ajudar a guardar la forma després del cuinat.

En aquest estudi també van fer ús d'un altre additiu per a fer que l'aliment extruït sigui apte per al cuinat, l'agar. L'agar es va examinar com a additiu alimentari per fer verdures imprimibles. (J. Lipton et al., 2010b) van crear un gel fluid d'api, primer de tot van fer un puré d'api i van afegir pols d'agar per permetre que es reconstituís i es cuinés. Les proves d'impressió es van fer amb la impressora 3D Fab@Home i els resultats van donar geometries complexes que es podien cuinar com un menjar normal. Tanmateix, es necessitava una estructura de bastida per formar el producte a causa del llarg temps de gelificació necessari per aconseguir una rigidesa suficient després de la deposició.

L'estudi (Kim et al., 2019) ofereix una solució al problema de la deformació de les galetes impreses en 3D durant el postprocessament, la cocció. Aquest estudi va investigar la influència de la incorporació d'hidrocol·loides en l'estabilitat dimensional de la massa de galetes durant l'augment de temperatura durant la cocció. Es van barrejar la metilcel·lulosa i la goma xantana en fraccions de massa de 0.5, 1, 2 i 3 g/100 g de massa.

Com hem vist anteriorment els hidrocol·loides són materials hidròfils que s'afegeixen a un sistema alimentari amb l'objectiu de modificar les propietats reològiques de matriu, com ara gelificar o espessir i per millorar l'estabilitat mecànica dels materials alimentaris durant el postprocessament. Per exemple, la metilcel·lulosa (MC) és termo-reversible, és a dir, quan s'escalfa pot gelificar-se i quan es refreda té la capacitat de liquar-se. La goma xantana (XG) també s'utilitza com a agent estructurant perquè presenta un fort efecte espessidor en un ampli espectre de temperatura, ideal per a productes que estan exposats a elevades temperatures com les galetes.

En els espectres mecànics de totes les mostres, G' era superior a G'' , la qual cosa indica que aquestes mesclures mostraven propietats de materials semblants als sòlids. En el control (sense hidrocol·loides) G' i G'' disminueixen contínuament a mesura que la temperatura augmenta degut a la fusió del greix de mantega. El midó de farina es va gelatinitzar al voltant dels 85 °C, donant lloc a l'augment de G' i G'' . Tanmateix, quan la temperatura va augmentar a més d'uns 120 °C, es va observar una nova disminució de G' i G'' .

La incorporació de XG a la massa va provocar un augment tant de la G' com de la G'' . Això indica que XG proporciona resistència mecànica, que podria ser beneficiosa perquè la massa de galetes resistís la deformació en un ampli rang de temperatures durant la cocció.

Tanmateix, quan es va incorporar MC a les masses no es va observar cap augment significatiu de G' i G'' independentment de la concentració de MC.

8 Aplicacions

La impressió 3D ens permet personalitzar els dissenys dels models d'impressió, per exemple, ens permet afegir probiòtics i fàrmacs. Però també ens permet dirigir-nos a pacients que necessiten una textura d'aliments específica, per exemple, pacients amb disfàgia. A continuació, es mostren les múltiples aplicacions que ens ofereix la impressió 3D d'aliments.

8.1 Nutrició personalitzada

Una de les aplicacions més interessants de la tecnologia 3DFP és la personalització dels aliments per a satisfer les necessitats nutricionals i de salut d'un individu, inclosos els requeriments medicinals i alimentaris.

La nutrició personalitzada ajuda a crear dietes específiques per a individus o grups de població específics, com ara esportistes, dones embarassades, persones grans o persones amb problemes de salut. Alguns additius optimitzen el procés de 3DFP alhora que també augmenten el valor nutricional dels productes finals, per exemple, el caseïnat de calci o la proteïna de pèsol (Chuanxing et al., 2018; Zhang, Lou, et al., 2018a).

8.2 Fàrmacs

Actualment molts estudis s'estan centrant en el desenvolupament d'objectes impresos en 3D per utilitzar-los com a "pharmaceutical carriers". Tanmateix, la incorporació de fàrmacs als aliments impresos en 3D és molt nou i només hi ha informació limitada disponible a la literatura científica.

El compliment del pacient amb el tractament mèdic és de vital importància per a una farmacoteràpia eficaç. La palatabilitat del medicament és un repte a l'hora de desenvolupar la seva formulació. En un estudi recent amb 153 participants

pediàtrics, el motiu principal de la negativa a la medicació administrada va ser l'aversion al gust (Mennella et al., 2015).

En l'estudi (Karavasili et al., 2020) van investigar una forma d'administració oral de fàrmacs tant hidròfils com lipòfils usant la impressió 3D basada en extrusió. L'objectiu va ser el desenvolupament de formes de dosificació orals a base de xocolata impresa en 3D. En aquest estudi es van realitzar anàlisis de perfil de textura i estudis de digestió in vitro per avaluar la dissolució del fàrmac. L'aplicació de la tecnologia d'impressió 3D permet una precisió en l'ajust de la dosi, alhora que permet la participació activa del pacient en la personalització del disseny. En aquest estudi, se va avaluar l'ús de dos compostos actius molt utilitzats en la població pediàtrica per alleujar el dolor i reduir la febre, el paracetamol i l'ibuprofè. La xocolata amarga i el xarop de blat de moro es van utilitzar com a excipients per a la preparació de les formulacions de tinta, ja que es poden imprimir en 3D en diferents formes, per exemple, dibuixos animats. Es va avaluar la dissolució del fàrmac en diferents mitjans simulant les fases oral i gàstrica.

La composició de les tintes de xocolata imprimibles consistia en xocolata amarga i xarop de blat de moro en una proporció d'1:1 en pes.

Les tintes en blanc es van basar en una barreja de xocolata amarga i xarop de blat de moro. Per a les tintes de xocolata imprimibles carregades amb fàrmacs, el paracetamol es va dissoldre mentre que l'ibuprofè es va fondre en el xarop de blat de moro a una concentració final de 22,9 mg/g i 19,6 mg/g, respectivament. Les tintes de xocolata es van carregar immediatament al cartutx de la impressora 3D i ja estaven llestes per a la impressió.

8.3 Disfàgia

La tecnologia 3DPF pot ajudar moltíssim a les persones amb trastorns de deglució, com la disfàgia.

El repte més important en la disfàgia és aconseguir la consistència i la textura adequada ja que les textures alimentàries inadequades poden causar asfíxia i la mort en persones amb malalties de la deglució (Hemsley et al., 2015).

Un dels beneficis de la impressió 3D és que permet dissenyar la geometria dels productes, d'aquesta forma els pacients es poden sentir més incentivats a l'hora de menjar, ja que menjar sempre puré pot resultar avorrit.

(Pant et al., 2021) va produir aliments impresos en 3D per tractar els trastorns de la disfàgia. Les matèries primeres que es van usar van ser els pèsols, la pastanaga i el bok choy, que es van fer puré i es van barrejar amb diferents gomes per desenvolupar aliments personalitzats impresos en 3D que compleixen les categories de la Iniciativa Internacional d'Estandardització de la Dieta de la Disfàgia (IDDSI). La idea principal consistia a utilitzar verdures deshidratades i hidrats de carboni per imprimir aliments impresos en 3D estètics i agradables al gust.

Aquests aliments impresos en 3D es poden distribuir o preparar en hospitals, residències d'avis i llars d'infants que atenen pacients amb patologies relacionades.

En aquest estudi, les propietats reològiques i textures es modifiquen amb hidrocol·loides (HC), com goma xantana (XG), carragenina kappa (KC) i goma de garrofa (LBG).

Els pèsols de jardí i les pastanagues es van bullir amb aigua durant 15 minuts i el bok choy es va cuinar al vapor durant 15 minuts. Cadascuna es va triturar fins aconseguir una consistència semblant a un puré. A continuació, es van tamisar els purés de verdures per a que les tintes no bloqueguessin el broquet de la impressora i es van afegir els hidrocoloides.

FOODINI (Natural Machines, Espanya), una impressora comercial d'aliments basada en extrusió es va utilitzar per imprimir aquestes tintes vegetals.

L'IDDSI classifica els aliments modificats texturalment en 8 nivells (0-7) i proposa una combinació de proves per determinar quin nivell textural tenen els aliments modificats. Es va utilitzar la prova de pressió de la forquilla on es pressionaven les mostres impreses amb el polze (pressió de ~ 17 kPa), equivalent a la pressió de la llengua utilitzada durant la deglució. La prova d'inclinació de la cullera es va realitzar en totes les formulacions de tinta per provar l'adhesivitat i cohesió.

(Mirazimi et al., 2022) van crear diferents formulacions amb proteïna de soja i agar afegit al puré de patata per afegir valor nutricional destinades a gent gran i persones amb disfàgia. Algunes formulacions de puré de patata enriquides es van obtenir afegint proteïna de soja (3%, 5% i 7%) i fins a un 0,2% d'agar. L'ús de la impressió tridimensional d'aliments permet la personalització visual. Segons les escales de l'International Dysphagia Diet Standardization Initiative (IDDSI), la textura de totes les mostres modificades va ser adequada per a persones amb dificultats per deglutir. Les mostres amb agar presentaven una forma millor impresa i un comportament més viscos que les mostres amb proteïna de soja. Aquestes troballes posen de manifest que la proteïna de soja podria modificar la textura i, des del punt de vista nutricional, afegir valor a les formulacions. L'addició d'agar al 0,2% pot establir un bon material per al disseny d'aliments impresos en tres dimensions (3D) que permeti la creació de textures d'acord amb les necessitats de la gent gran i les persones amb disfàgia.

Totes les mostres de puré de patata enriquides amb soja van mostrar un comportament no newtonià, ja que la viscositat disminuïa amb l'augment de la tensió de cisalla.

En les proves de pressió de la forquilla i d'inclinació de la cullera totes les formulacions podien lliscar-se de la cullera en inclinar-se i demostraven que no s'enganxaven a la cavitat bucal. Tanmateix, es requereixen estudis addicionals per acceptar l'aliment com a dieta disfàgica.

8.4 Al·lèrgies

Les al·lèrgies o intoleràncies a la lactosa, caseïna, gluten, ou, cacauet, sèsam, fructosa, soja, fruits secs, peix i marisc constitueixen les reaccions al·lèrgiques més comunes a la majoria de països del món. Avui dia, no hi ha cura per a les al·lèrgies alimentàries que no sigui l'evitació d'al·lèrgens i el tractament ràpid de les reaccions al·lèrgiques.

En el futur, una impressora d'aliments 3D es podria utilitzar com a dispositiu personal on cada persona tindria les seves càpsules amb materials alimentaris lliures de contaminació creuada.

8.5 Alimentació infantil

Una alimentació saludable, sobretot a edats primerenques, és un factor clau per prevenir moltes malalties. Les recomanacions de la OMS on es destaca el consum d'aliments variats, sobretot verdures i fruites, no es solen seguir, sobretot en la població infantil. Aquest escenari representa la ingesta insuficient de diverses vitamines i/o minerals com la vitamina D, el ferro i el calci, importants per als nens i adolescents.

En aquest context, les tecnologies d'impressió 3D es podrien utilitzar per obtenir aliments 3D nutricionalment personalitzats. La impressió 3D podria proporcionar un aspecte visual molt més apreciat per a consumidors com nens i adolescents millorant la ingesta potencial de nutrients.

L'objectiu principal de l'estudi (Derossi et al., 2018) va ser investigar l'ús de la tecnologia d'impressió 3D per desenvolupar una fórmula alimentària dissenyada nutricionalment per a nens, per construir aperitius més agradables en 3D.

Els ingredients per a la formulació són: plàtans frescos, bolets secs, mongetes blanques en conserva, llet deshidratada, suc de llimona, pectina en pols E440 i àcid (+)-ascòrbic.

El plàtan es va escollir arbitràriament com a ingredient. D'altra banda, s'han escollit les mongetes blanques, els bolets (*Boletus edulis*) i la llet sense greix perquè són una bona font de ferro, vitamina D i calci, respectivament.

Tots els ingredients es van triturar i es van passar per un colador de 0,6µm per a que la mescla no col·lapsi el broquet. Es va preparar una solució de pectina (11% p/p) dissolent pols de pectina en aigua destil·lada. Aquesta solució de pectina era necessària per conferir una consistència suficient per a la impressió i evitar la fase de separació entre l'aigua i el teixit vegetal durant la deposició. La concentració de solució de pectina es va definir a partir d'experiments d'impressió preliminars durant els quals es va avaluar la capacitat de la fórmula alimentària per fluir contínuament a través del broquet.

Els hàbits alimentaris dels nens petits es podrien millorar mitjançant la 3DFP per a augmentar el seu interès per consumir fruites, verdures i llegums. Es poden

crear aperitius equilibrats, saludables i alhora atractius amb formes desitjades, per exemple, dinosaures, superherois...

8.6 Aliments funcionals i productes nutracèutics

L'objectiu principal dels aliments funcionals i nutracèutics és millorar la salut pública o disminuir l'alta incidència de malalties no transmissibles.

S'ha estudiat l'addició d'algunes substàncies per desenvolupar productes sanitaris per part de 3DP.

8.6.1 Vitamina C

La vitamina C, la luteïna i l'extracte de nabiu es van barrejar amb èxit amb xocolata per produir aliments funcionals impresos en 3D; no obstant això, encara s'han de resoldre alguns problemes de rendiment. Per exemple, algunes propietats, com ara el grau de finor, la viscositat i el rendiment fluït, van aportar algunes dificultats per formar geometries de xocolata (Hao et al., 2018).

8.6.2 Probiòtics

Una altra aplicació atractiva del 3DFP és la millora de la digestibilitat i la salut gastrointestinal. Els múltiples problemes digestius que poden anar des de la boca fins a l'anus, provoquen hospitalitzacions per la manca d'adhesió als tractaments dietètics i farmacèutics (Lipton, 2017). La personalització de la dieta amb 3DFP pot reduir les complicacions i hospitalitzacions ja que permet seguir les recomanacions nutricionals de cada pacient.

El microbioma gastrointestinal conté uns 10^{14} bacteris que es troben principalment a l'intestí gros. Aquest microbioma ben establert i saludable impedeix la colonització de microorganismes potencialment patògens. Produir aliments impresos en 3D ens brinda l'oportunitat d'introduir probiòtics als aliments per millorar els problemes digestius i trastorns gastrointestinals.

Resultats reportats en l'estudi (Zhang, Lou, et al., 2018b) ofereixen una nova opció per al desenvolupament de productes de fleca innovadors que contenen probiòtics. En aquest estudi van investigar la viabilitat de la impressió 3D per fabricar estructures alimentàries a base de cereals que contenen probiòtics. Es van avaluar diverses formulacions de massa amb diferents continguts d'aigua i

quantitat de caseïnat de calci i sobretot, van fer èmfasis en la relació superfície-volum per a la supervivència dels probiòtics.

Els probiòtics són microorganismes vius que confereixen beneficis per a la salut a l'hoste quan es consumeixen en quantitats adequades. Els productes alimentaris poden portar probiòtics amb l'objectiu de lliurar microorganismes probiòtics a l'intestí humà on afecten positivament la salut intestinal.

Mantenir un nombre suficient de microorganismes probiòtics vius en els productes de forn és un repte per a la indústria alimentària a causa de l'alta sensibilitat dels probiòtics a la elevada temperatura.

En general, la supervivència dels probiòtics durant la cocció depèn de la temperatura, el temps de cocció i el contingut d'humitat inicial de la massa. Els bacteris probiòtics són més estables tèrmicament quan s'incorporen en una matriu alimentària amb un contingut d'humitat més baix (Zhang, Chen, et al., 2018). Així, augmentar la velocitat d'assecat durant la cocció pot afavorir la supervivència del probiòtic perquè es pot arribar a un menor contingut d'humitat de la matriu alimentària en menys temps. Una forma d'aconseguir-ho és mitjançant la impressió 3D d'un model que tingui una alta relació superfície-volum.

Per aconseguir una impressió exitosa de la massa de blat, la formulació de la massa es va optimitzar variant la proporció farina/aigua (contingut d'aigua), el tipus de farina utilitzada (alt contingut en proteïnes, B, o baix contingut, A, en proteïnes) i la quantitat d'additiu utilitzat (caseïnat de calci). Tots els ingredients es van pesar i es van barrejar manualment per formar la massa a temperatura ambient. A la formulació es van afegir bacteris probiòtics (*Lactobacillus plantarum* WCFS1). Després de barrejar, es va deixar reposar la massa durant 10 minuts abans de transferir-la a una xeringa per a l'experiment d'impressió 3D.

Posteriorment, es van imprimir estructures amb diferents relacions superfície-volum i després es van coure a diferents temperatures.

La farina tipus A té un contingut de proteïnes del 7,2% w/w. Mentre que la farina tipus B té un contingut de proteïnes del 12% w/w.

Taula 9 Composició dels productes de fleca

Formulació núm.	Tipus de farina	Farina (g)	Aigua (g)	Caseïnat de calci (g)
1	A	33	30	
2	A	36	30	
3	A	39	30	
4	B	39	30	
5	A	39	30	0,30
6	A	39	30	9,78
7	A	39	30	1,17

Les estructures impreses es van coure en un forn a 145 °C durant 16 min, i a 175 o 205 °C durant 8 min. Després de coure, els objectes es van transferir immediatament i es van guardar a la nevera a 4 °C.

La composició de la massa influeix en les propietats viscoelàstiques. En primer lloc, la quantitat d'aigua present a la massa té un paper important en les propietats viscoelàstiques. Si analitzem les formulacions núm. 1, 2 i 3 conforme disminueix el contingut d'aigua a la massa, va augmentant G' i G'' , la qual cosa afavoreix la impressió. A més, si comparem la formulació núm. 4 amb la formulació núm. 3 (mateix contingut d'aigua però diferent contingut de proteïna), l'augment del contingut de proteïnes va tenir efectes similars sobre les propietats viscoelàstiques dinàmiques. Això és degut perquè el contingut més elevat de proteïnes va afavorir la formació d'una xarxa de gluten contínua.

L'ús de farina de blat amb baix contingut en proteïnes, un contingut d'aigua relativament més baix i l'addició de caseïnat de calci van donar lloc a bones propietats de la massa tant per a una fàcil extrusió des del broquet com per a una bona estabilitat després de la impressió. L'addició de caseïna va canviar significativament les propietats reològiques de la massa, canviant les seves propietats viscoelàstiques cap a valors típics dels gels forts (G' és molt superior a G'').

La formulació de massa núm. 7 es va considerar òptima en aquest estudi a causa de la seva extrusió desitjada durant la impressió i resistència després de la impressió. Després van provar d'imprimir la massa seguint 2 dissenys geomètrics per a analitzar la relació superfície-volum. Els dissenys geomètrics eren un cilindre concèntric o una bresca i es va estimar que la relació superfície-volum corresponent de les dues estructures era de $7,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ i $9,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, respectivament.

El contingut d'humitat del disseny de bresca va disminuir més ràpidament que en el disseny concèntric a la mateixa temperatura de cocció perquè la seva superfície és més gran i això va accelerar el procés d'assecat. La diferència en el contingut d'humitat també va provocar una textura diferent de les estructures, l'estructura cuita amb un contingut d'humitat més baix era més trencadissa i més dura. Tot i això la viabilitat residual de LP a l'estructura de bresca es va trobar més alta que en l'estructura concèntrica quan s'aconseguia el mateix contingut d'humitat (per exemple, 40%).

Per tant, aquest estudi va plantejar la hipòtesi que la supervivència dels probiòtics es podria millorar augmentant la relació superfície/volum de l'estructura i a partir dels resultats d'aquest estudi, aquesta hipòtesi es va comprovar com a certa.

8.7 Anàlegs de carn

NovaMeat, una startup espanyola de bioenginyeria, va desenvolupar un bistec vegetarià sintètic imprès en 3D que imitava la textura de la vedella o el pollastre. Van crear una pasta vermella que inclou ingredients com arròs, pèsols i proteïnes d'algues, tots contenen aminoàcids amb propietats nutricionals. Aquesta pasta després se li va donar forma de filet mitjançant una impressora 3D personalitzada. Es va barrejar el contingut de proteïnes amb un colorant de paella, que va donar lloc a una substància vermella gelatinosa.

8.8 Nutrició personalitzada dels astronautes

A través del programa Advanced Food Technology, la National Aeronautics and Space Administration (NASA) ha començat a explorar la possibilitat d'utilitzar 3DFP en missions espacials. La personalització de la dieta dels astronautes

podria millorar significativament la variabilitat de la seva dieta durant els viatges espacials. (Escalante-Aburto et al., 2021).

El dispositiu dissenyat ha d'incloure un sistema d'emmagatzematge de macro i micronutrients, un sistema de mescla per formular pastes i un sistema de dispensació del producte final amb una vida útil més llarga. El dispositiu també hauria de generar residus zero. La seguretat microbiològica dels aliments és una preocupació important per tant, hi ha una tasca important a l'hora de desenvolupar aliments més segurs a l'hora que nutritius produïts per un sistema de vol espacial de llarga durada per garantir la seguretat alimentària (Kim & Rhee, 2020).

9 Perspectives Futures

Hi ha moltes dificultats perquè aquesta tecnologia s'utilitzi àmpliament en el sector alimentari a causa de diversos motius: precisió d'impressió, productivitat del procés, producció de productes colorits, multisabor i multiestructura.

La precisió d'impressió és fonamental per a l'aplicació de la tecnologia d'impressió 3D al sector alimentari. Per aconseguir una impressió precisa, propietats del material (és a dir, propietats reològiques, mida de partícules, etc.), paràmetres del procés (és a dir, diàmetre del broquet, velocitat d'impressió, distància d'impressió, etc.) i mètodes de post processament (és a dir, cocció, fregit, cocció) s'haurien de tenir en compte i s'haurien d'optimitzar.

Millorar l'eficiència de la producció pot reduir els costos de producció. Un exemple comú de millorar la productivitat del procés és augmentar la velocitat d'impressió i utilitzar broquets de gran diàmetre. Tanmateix, això sovint comporta la reducció de la precisió i la resolució dels objectes impresos, situant així la impressió 3D d'aliments en una circumstància desfavorable. Una altra manera potencial de millorar la productivitat de la impressió és utilitzar impressores de múltiples broquets per fabricar diversos objectes simultàniament. Tanmateix, això segurament augmentarà la complexitat del sistema de control i el repte tècnic.

El desconeixement entre els consumidors sobre tecnologies innovadores i tecnologies en desenvolupament pot ser un obstacle per a l'acceptació. El processament del menjar usant tecnologia 3D està emergint i el seu impacte encara s'ha d'estudiar en més profunditat. L'objectiu de la innovació en la

tecnologia de l'alimentació és actualitzar mètodes tradicionals de producció de productes alimentaris en termes de qualitat, quantitat, temps de preparació, precisió dels ingredients, contingut nutricional, textura, aparença i vida útil i augmentar la funcionalitat dels aliments. L'ambigüitat es produeix quan els detalls de un procés o producte són impredecibles, vagues o complexes de manera que els consumidors no els entenen bé. Per tant, la informació racional juntament amb el suport de les troballes científiques són vitals per a l'acceptabilitat dels consumidors (Mantihal et al., 2020).

Alguns aspectes que s'han de millorar per a que la tecnologia d'impressió 3D prosperi significativament en un futur són els següents:

1. Millora d'equips i materials per a la impressió 3D: La velocitat d'impressió encara és limitada i no pot satisfer les necessitats dels consumidors. A més de la neteja de l'equip, cal millorar l'obstrucció de broquets. A més, la formació professional encara és necessària per a utilitzar la impressora d'aliments 3D. Per a que en un futur es pugui gestionar la impressió 3D des de casa i pugui assolir la mateixa popularitat que un forn o un microones, fa falta un funcionament més senzill de les impressores. Tot i que s'estan fent esforços per a la investigació de materials adaptats a la impressió 3D d'aliments, la quantitat de matèries primeres adequades per a la impressió d'aliments en 3D disponibles comercialment és insuficient.
2. Popularitzar adequadament aquesta tecnologia: Si els consumidors estan convençuts que aquesta tecnologia no proporciona cap benefici addicional per a ells ni per a la societat i només pot tenir avantatges per als productors i la indústria no es podrà incorporar aquesta tecnologia a les seves llars.
La distància per popularitzar la impressió d'aliments en 3D semblant al forn de microones encara és un objectiu a llarg termini. Els investigadors i els empresaris haurien de col·laborar per popularitzar aquesta nova tecnologia. Les empreses alimentàries podrien cooperar afegint aquesta tecnologia a la seva empresa, com ara hospitals o locals de rebosteria...
3. Reforçar la propaganda: Els clients tenen una informació molt limitada sobre les noves tecnologies i poden tenir dificultats per avaluar els riscos

associats a un aliment nou, però també poden ser incapaços d'estimar els possibles beneficis. Els consumidors habitualment confien en els mitjans de comunicació, els científics i el govern. Una proposta per a augmentar l'acceptació d'aquesta tecnologia és dur a diferents programes televisius, un conjunt d'investigadors que proporcionin informació sobre aquesta tecnologia amb un argot popular per a poder arribar a tot el públic. A part, el govern també es podria involucrar i informar als ciutadans mitjançant conferències, reunions, etc.

La intel·ligència artificial (IA) també és una innovació prometedora per a millorar la impressió 3D d'aliments. La impressió 3D es pot utilitzar juntament amb la IA per a l'optimització de processos, de les formulacions de pastes imprimibles, de processos de post impressió, entre d'altres.

La principal tècnica per a desenvolupar nous aliments és l'experimentació; no obstant això, aquesta tècnica comporta elevats costos (material, matèries primeres, entre altres), que també tenen un alt impacte ambiental (Garcia-Garcia et al., 2021). Per tant, s'han implementat altres tecnologies per reduir costos, per exemple, la intel·ligència artificial (IA) (Kakani et al., 2020). Els processos d'optimització per formular les pastes imprimibles s'han realitzat experimentalment.

Algunes investigacions ja han aplicat AI als processos d'extrusió, per predir les propietats reològiques d'algunes pastes d'origen vegetal (Bhagya Raj & Dash, 2022), i propietats com el color i la textura en una pasta d'arròs extruïda. Una de les aplicacions més interessants de l'AI que té un major potencial de creixement és la nutrició personalitzada. La IA utilitza models matemàtics i tècniques estadístiques per a formular aliments segons les necessitats dels seus clients

Com s'ha esmentat anteriorment, l'ús combinat d'AI i la impressió 3D s'ha començat a utilitzar especialment en la indústria farmacèutica. Ambdues tecnologies han permès optimitzar processos, reduir el nombre d'assaigs experimentals i predir les propietats finals dels productes, entre d'altres.

10 Conclusions

Per a poder optimitzar les receptes de les tintes alimentàries i la impressió 3D és necessari avaluar les propietats reològiques de les matèries primeres i els

paràmetres d'impressió. Com veurem a continuació, no podem posar uns valors estàndards per a la impressió 3D, ja que cada matèria primera necessita un pretractament diferent i uns paràmetres d'impressió diferents.

La importància de la velocitat d'impressió va ser reportada principalment per (Yang et al., 2018a) amb la impressió de gels de suc de llimona. Van trobar que la impressió donava una deposició irregular de filaments trencats a causa de la deposició insuficient de la fórmula alimentària i va concloure que ha d'haver una relació lineal entre la velocitat d'impressió i el caudal volumètric d'extrusió per tal d'assegurar formes finals precises.

La mida del broquet i la pressió a la que surt el material imprès estan estretament relacionats. Escollir la millor mida del broquet per a la impressió depèn del tipus de material que s'imprimeix i, posteriorment, determina la pressió exercida sobre el flux del material des d'aquest broquet. La mida depèn novament de la reologia i les propietats estructurals del material.

En l'estudi on s'imprimeixen gels de surimi (L. Wang et al., 2018), es va obtenir la millor resolució i qualitat superficial utilitzant un diàmetre de 2 mm, la impressió de gels de surimi amb un diàmetre de broquet més petit (0,8 mm) va conduir a filaments extruïts pobres, a causa del major efecte de cisalla que s'aplica a una mida relativament menor de broquet. Mentre que en l'estudi, per exemple, de (Severini, Azzollini, et al., 2018) on van obtenir aperitius a partir de massa de farina de blat enriquida amb larves de *Tenebrio molitor*, el diàmetre ideal per a la impressió era 0,84mm. Per tant, la mida del broquet depèn del tipus del material. Per a optimitzar les receptes i el disseny experimental primer s'haurien de fer proves per a ajustar el diàmetre del broquet segons les propietats reològiques de les tintes usades en aquell moment. El broquet hauria de ser lo suficientment petit per a donar una impressió precisa però hauria de permetre exercir la pressió exacta per a que el material no surti amb una pressió exacerbada.

La distància entre el broquet i el llit d'impressió (alçada del broquet) és un altre paràmetre que determina la qualitat del producte imprès resultant. Com hem pogut veure al llarg d'aquest treball, hi ha una distància òptima per a cada material específic que s'imprimeix.

(L. Wang et al., 2018) que van imprimir gel de surimi de peix, van trobar que l'alçada del broquet influïa molt en la forma geomètrica del material extruït. L'alçada òptima per a proporcionar formes amb la màxima fidelitat i una bona unió entre les capes va ser de 5 mm.

Tanmateix, (Kim et al., 2018), com hem vist, van usar tres pols vegetals diferents: bròquil, fulles d'espínacs i pastanagues i es van barrejar amb 4 hidrocol·loides. L'alçada de broquet òptima per a aquest estudi va ser 1,6 mm. De nou, això emfatitza la idea que l'optimització de la tècnica seria específica de l'ingredient i la configuració que es realitza.

Per tant, podem concloure que totes les variables d'impressió estan relacionades amb les característiques específiques de les tintes usades.

Pel que fa a les propietats reològiques, és molt important conèixer la reologia dels productes alimentaris per predir l'anàlisi del disseny del procés i les condicions de flux en la impressió 3D, tal i com s'explica anteriorment. Un dels paràmetres reològics més importants a determinar abans de la impressió 3D és la viscositat. Els materials han de tenir una viscositat prou alta perquè les seves capes puguin suportar el pes de les capes posteriors. En aquest treball hem vist que es poden utilitzar additius per a retenir les propietats reològiques, com per exemple, la transglutaminasa a la carn i l'agar a les verdures (J. Lipton et al., 2010a).

(Liu et al., 2018) van examinar les propietats reològiques del puré de patates combinats amb midó de patata per avaluar el comportament durant la impressió 3D. La millor imprimibilitat es va obtenir combinant un 2% de midó de patata amb puré de patates. De la mateixa manera, (Yang et al., 2018a) van trobar que l'addició d'un alt contingut de midó (17.5, 20 g/100 g) als gels de suc de llimona va provocar una viscositat elevada que va donar dificultats en l'extrusió, mentre que l'addició de 15 g/100 g de midó va ser òptim i va donar un flux més suau del gel de llimona, obtenint un producte final que s'ajustava millor a la geometria objectiu.

Altres troballes també van demostrar que la reologia del material imprimible es pot millorar usant, per exemple, sal. (L. Wang et al., 2018) van revelar que el comportament reològic del gel de surimi de peix amb 1,5 g/100g de NaCl és

adequat per a la impressió, ja que l'addició de NaCl permet disminuir la viscositat del gel de surimi, facilitant així la seva extrusió a través del broquet, degut a la inflamació de la proteïna miofibril·lar i, per tant, un augment de la interacció proteïna-proteïna.

Respecte al post processament, els estudis són molt escassos però sí que podem treure la conclusió que de moment, la transglutaminassa permet la cocció de productes càrnics, com les vieires, mentre que hidrocol·loides com l'agar van més dirigits a la cocció de verdures, com l'api, tot i necessitar una bastida.

A l'igual que no podem posar uns valors estàndards en la impressió, tampoc podem saber en exactitud quin additiu va millor per a cada tinta. Gràcies a aquest treball que sintetitza la majoria de la literatura científica sobre la impressió 3D d'aliments, podríem predir que la goma Xantana juntament amb l'agar són els que donen els resultats més bons alhora de millorar els paràmetres d'impressió. Alguns estudis que hem avaluat i que usen exitosament la goma Xantana són (Kim et al., 2018, 2019) i (Pant et al., 2021). Els estudis que usen agar amb bons resultats han estat (J. Lipton et al., 2010a i (Mirazimi et al., 2022).

Per tant, és necessari fer proves abans de començar amb la impressió definitiva per a definir els paràmetres correctes per a cada experiment i el pretractament correcte.

Respecte a l'ús de proteïnes alternatives com a base en la impressió 3D, es creu que ens ajudaran molt en un futur a mitigar l'amenaça del canvi climàtic provocat per la indústria càrnica. A més, ens permeten fer aliments convencionals però amb més qualitat nutricional, per exemple, snacks amb base de insectes o microalgues.

En combinació amb la nutrigenòmica, la tecnologia d'impressió 3D podrà crear menjars basats en la informació genètica d'un individu.

Normalment, els aliments impresos necessiten un tractament posterior per a millorar-ne les propietats nutritives, el sabor i la seguretat, però actualment els estudis al respecte estan bastant limitats. La congelació, el tractament tèrmic o la radiació són temes importants de recerca i desenvolupament i que ara tenen limitacions, però en un futur estic segura que no. A part de la nutrició

personalitzada, hi ha múltiples aplicacions, com per exemple, permetre a la gent amb disfàgia tenir una dieta variada, agradable i òptima per a garantir la seva salut. A part, també permet introduir fruites i verdures a la dieta de nens d'una manera divertida. Una altra aplicació rellevant és que permet la creació d'aliments funcionals, amb l'addició de probiòtics o components bioactius.

11 Autoavaluació

Quan vaig començar aquest TFG no tenia ningun tipus de coneixement sobre impressores 3D, en canvi, sí que tenia molt de coneixement sobre proteïnes alternatives pel meu estil de vida vegà, per això quan em van proposar fer el TFG tutoritzat per Ingrid Aguiló, amb temàtica d'impressió 3D i proteïnes alternatives vaig veure l'oportunitat d'aprendre coses noves i de reptar la meva capacitat de comprensió i recol·lecció d'informació. Amb aquest treball he après a organitzar-me millor i treballar sota pressió per a poder compaginar-ho tot (aprovar les assignatures del segon quadrimestres, pràctiques externes, la feina i el TFG).

12 Agraïments

En primer lloc vull mostrar agraïment a la meva tutora Dra. Ingrid Aguiló Aguayo per ajudar-me sempre que ho he necessitat, per la quantitat d'informació tan bona que m'ha proporcionat i pel seu bon tracte. També vull agrair als meus pares per ajudar-me a tirar endavant, escoltar-me i comprendre'm durant aquests 4 anys de carrera, tot i no haver pogut dedicar-los el temps que es mereixen.

13 Referències

1. Anzani, C., Boukid, F., Drummond, L., Mullen, A. M., & Álvarez, C. (2020). Optimising the use of proteins from rich meat co-products and non-meat alternatives: Nutritional, technological and allergenicity challenges. *Food Research International*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109575>
2. Baiano, A. (2022). 3D Printed Foods: A Comprehensive Review on Technologies, Nutritional Value, Safety, Consumer Attitude, Regulatory Framework, and Economic and Sustainability Issues. In *Food Reviews International* (Vol. 38, Issue 5). <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1762091>

3. Ben-Arye, T., Shandalov, Y., Ben-Shaul, S., Landau, S., Zagury, Y., Ianovici, I., Lavon, N., & Levenberg, S. (2020). Textured soy protein scaffolds enable the generation of three-dimensional bovine skeletal muscle tissue for cell-based meat. *Nature Food*, 1(4). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0046-5>
4. Bhagya Raj, G. V. S., & Dash, K. K. (2022). Comprehensive study on applications of artificial neural network in food process modeling. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(10), 2756–2783. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1858398>
5. Blutinger, J. D., Cooper, C. C., Karthik, S., Tsai, A., Samarelli, N., Storvick, E., Seymour, G., Liu, E., Meijers, Y., & Lipson, H. (2023). The future of software-controlled cooking. *Npj Science of Food*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41538-023-00182-6>
6. Cando, D., Herranz, B., Borderías, A. J., & Moreno, H. M. (2015). Effect of high pressure on reduced sodium chloride surimi gels. *Food Hydrocolloids*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.05.016>
7. Caporgno, M. P., & Mathys, A. (2018). Trends in Microalgae Incorporation Into Innovative Food Products With Potential Health Benefits. *Frontiers in Nutrition*, 5. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00058>
8. Chuanxing, F., Qi, W., Hui, L., Quancheng, Z., & Wang, M. (2018). Effects of Pea Protein on the Properties of Potato Starch-Based 3D Printing Materials. *International Journal of Food Engineering*, 14(3). <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0297>
9. Dankar, I., Haddarah, A., Omar, F. E. L., Sepulcre, F., & Pujolà, M. (2018). 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 75). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.018>
10. Derossi, A., Caporizzi, R., Azzollini, D., & Severini, C. (2018). Application of 3D printing for customized food. A case on the development of a fruit-based snack for children. *Journal of Food Engineering*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.015>
11. Escalante-Aburto, A., Trujillo-de Santiago, G., Álvarez, M. M., & Chuck-Hernández, C. (2021). Advances and prospective applications

- of 3D food printing for health improvement and personalized nutrition. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(6), 5722–5741. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12849>
12. Garcia-Garcia, G., Azanedo, L., & Rahimifard, S. (2021). Embedding sustainability analysis in new food product development. *Trends in Food Science and Technology*, 108, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.018>
 13. Godoi, F. C., Prakash, S., & Bhandari, B. R. (2016). 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025>
 14. Govindharaj, M., Roopavath, U. K., & Rath, S. N. (2019). Valorization of discarded Marine Eel fish skin for collagen extraction as a 3D printable blue biomaterial for tissue engineering. *Journal of Cleaner Production*, 230, 412–419. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.082>
 15. Guo, W., Zhu, S., Li, S., Feng, Y., Wu, H., & Zeng, M. (2021). Microalgae polysaccharides ameliorates obesity in association with modulation of lipid metabolism and gut microbiota in high-fat-diet fed C57BL/6 mice. *International Journal of Biological Macromolecules*, 182, 1371–1383. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.067>
 16. Hao, L., Li, Y., Gong, P., & Xiong, W. (2018). Material, process and business development for 3D chocolate printing. In *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814564-7.00008-0>
 17. Hao, L., Mellor, S., Seaman, O., Henderson, J., Sewell, N., & Sloan, M. (2010). Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 5(2), 57–64. <https://doi.org/10.1080/17452751003753212>
 18. Hashempour-Baltork, F., Hosseini, H., Houshiarrad, A., & Esmaeili, M. (2019). Contamination of foods with arsenic and mercury in Iran: a comprehensive review. In *Environmental Science and Pollution*

- Research* (Vol. 26, Issue 25). <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05863-y>
19. Hemsley, B., Balandin, S., Sheppard, J. J., Georgiou, A., & Hill, S. (2015). A call for dysphagia-related safety incident research in people with developmental disabilities. *Journal of Intellectual and Developmental Disability*, 40(1), 99–103. <https://doi.org/10.3109/13668250.2014.994172>
 20. Jayathilakan, K., Sultana, K., Radhakrishna, K., & Bawa, A. S. (2012). Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 49(3), 278–293. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0290-7>
 21. Jiang, H., Zheng, L., Zou, Y., Tong, Z., Han, S., & Wang, S. (2019). 3D food printing: main components selection by considering rheological properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(14), 2335–2347. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1514363>
 22. Kakani, V., Nguyen, V. H., Kumar, B. P., Kim, H., & Pasupuleti, V. R. (2020). A critical review on computer vision and artificial intelligence in food industry. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100033>
 23. Karavasili, C., Gkaragkounis, A., Moschakis, T., Ritzoulis, C., & Fatouros, D. G. (2020). Pediatric-friendly chocolate-based dosage forms for the oral administration of both hydrophilic and lipophilic drugs fabricated with extrusion-based 3D printing. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2020.105291>
 24. Kim, H. W., Lee, I. J., Park, S. M., Lee, J. H., Nguyen, M.-H., & Park, H. J. (2019). Effect of hydrocolloid addition on dimensional stability in post-processing of 3D printable cookie dough. *LWT*, 101, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.019>
 25. Kim, H. W., Lee, J. H., Park, S. M., Lee, M. H., Lee, I. W., Doh, H. S., & Park, H. J. (2018). Effect of Hydrocolloids on Rheological Properties and Printability of Vegetable Inks for 3D Food Printing. *Journal of*

- Food Science*, 83(12), 2923–2932. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14391>
26. Kim, H. W., & Rhee, M. S. (2020). Space food and bacterial infections: Realities of the risk and role of science. *Trends in Food Science and Technology*, 106, 275–287. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.023>
27. Lidiane M Andrade. (2019, January 19). *Chlorella and spirulina microalgae as sources of functional foods, nutraceuticals, and food supplements; an overview*.
28. Lipton, J., Arnold, D., Nigl, F., Lopez, N., Cohen, D., Norén, N., & Lipson, H. (2010a). Mutli-material food printing with complex internal structure suitable for conventional post-processing. *21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2010*, 809–815.
29. Lipton, J., Arnold, D., Nigl, F., Lopez, N., Cohen, D., Norén, N., & Lipson, H. (2010b). Mutli-material food printing with complex internal structure suitable for conventional post-processing. *21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2010*, 809–815.
30. Lipton, J. I. (2017). Printable food: the technology and its application in human health. *Current Opinion in Biotechnology*, 44, 198–201. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.11.015>
31. Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Wang, Y. (2017). 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science and Technology*, 69, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.018>
32. Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Yang, C. (2018). Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220, 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.017>
33. Mantihal, S., Kobun, R., & Lee, B.-B. (2020). 3D food printing of as the new way of preparing food: A review. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2020.100260>

34. Mennella, J. A., Roberts, K. M., Mathew, P. S., & Reed, D. R. (2015). Children's perceptions about medicines: Individual differences and taste. *BMC Pediatrics*, *15*(1). <https://doi.org/10.1186/s12887-015-0447-z>
35. Mirazimi, F., Saldo, J., Sepulcre, F., Gràcia, A., & Pujola, M. (2022). Enriched puree potato with soy protein for dysphagia patients by using 3D printing. *Food Frontiers*, *3*(4). <https://doi.org/10.1002/fft2.149>
36. Okagu, O. D., Verma, O., McClements, D. J., & Udenigwe, C. C. (2020). Utilization of insect proteins to formulate nutraceutical delivery systems: Encapsulation and release of curcumin using mealworm protein-chitosan nano-complexes. *International Journal of Biological Macromolecules*, *151*, 333–343. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.198>
37. Ong, K. J., Johnston, J., Datar, I., Sewalt, V., Holmes, D., & Shatkin, J. A. (2021). Food safety considerations and research priorities for the cultured meat and seafood industry. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *20*(6). <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12853>
38. Pant, A., Lee, A. Y., Karyappa, R., Lee, C. P., An, J., Hashimoto, M., Tan, U.-X., Wong, G., Chua, C. K., & Zhang, Y. (2021). 3D food printing of fresh vegetables using food hydrocolloids for dysphagic patients. *Food Hydrocolloids*, *114*. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106546>
39. Qiu, Y., McClements, D. J., Chen, J., Li, C., Liu, C., & Dai, T. (2023). Construction of 3D printed meat analogs from plant-based proteins: Improving the printing performance of soy protein- and gluten-based pastes facilitated by rice protein. *Food Research International*, *167*. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112635>
40. Ramachandraiah, K. (2021). Potential development of sustainable 3d-printed meat analogues: A review. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su13020938>
41. Ritala, A., Häkkinen, S. T., Toivari, M., & Wiebe, M. G. (2017). Single cell protein-state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001-

2016. *Frontiers in Microbiology*, 8(OCT).
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02009>
42. Severini, C., Azzollini, D., Albenzio, M., & Derossi, A. (2018). On printability, quality and nutritional properties of 3D printed cereal based snacks enriched with edible insects. *Food Research International*, 106, 666–676.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.034>
43. Severini, C., Derossi, A., Ricci, I., Caporizzi, R., & Fiore, A. (2018). Printing a blend of fruit and vegetables. New advances on critical variables and shelf life of 3D edible objects. *Journal of Food Engineering*, 220, 89–100.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.025>
44. Shirazi, S. F. S., Gharekhani, S., Mehrali, M., Yarmand, H., Metselaar, H. S. C., Adib Kadri, N., & Osman, N. A. A. (2015). A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: Selective laser sintering and inkjet 3D printing. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16(3).
<https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/3/033502>
45. Skotnicka, M., Karwowska, K., Kłobukowski, F., Borkowska, A., & Pieszko, M. (2021). Possibilities of the development of edible insect-based foods in Europe. In *Foods* (Vol. 10, Issue 4).
<https://doi.org/10.3390/foods10040766>
46. Uribe-Wandurraga, Z. N., Zhang, L., Noort, M. W. J., Schutyser, M. A. I., García-Segovia, P., & Martínez-Monzó, J. (2020). Printability and Physicochemical Properties of Microalgae-Enriched 3D-Printed Snacks. *Food and Bioprocess Technology*, 13(11), 2029–2042.
<https://doi.org/10.1007/s11947-020-02544-4>
47. van der Fels-Klerx, H. J., Meijer, N., Nijkamp, M. M., Schmitt, E., & van Loon, J. J. A. (2020). Chemical food safety of using former foodstuffs for rearing black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) for feed and food use. *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(5).
<https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0024>
48. Wang, L., Zhang, M., Bhandari, B., & Yang, C. (2018). Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing. *Journal*

- of *Food Engineering*, 220, 101–108.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.029>
49. Wang, M., Lu, X., Zheng, X., Li, W., Wang, L., Qian, Y., & Zeng, M. (2023). Rheological and physicochemical properties of *Spirulina platensis* residues-based inks for extrusion 3D food printing. *Food Research International*, 169.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112823>
50. Westhoek, H., Lesschen, J. P., Rood, T., Wagner, S., De Marco, A., Murphy-Bokern, D., Leip, A., van Grinsven, H., Sutton, M. A., & Oenema, O. (2014). Food choices, health and environment: Effects of cutting Europe's meat and dairy intake. *Global Environmental Change*, 26(1), 196–205.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.02.004>
51. Yang, F., Zhang, M., Bhandari, B., & Liu, Y. (2018a). Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters. *LWT*, 87, 67–76.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.054>
52. Yang, F., Zhang, M., Bhandari, B., & Liu, Y. (2018b). Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters. *LWT*, 87, 67–76.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.054>
53. Zhang, L., Chen, X. D., Boom, R. M., & Schutyser, M. A. I. (2018). Survival of encapsulated *Lactobacillus plantarum* during isothermal heating and bread baking. *LWT*, 93, 396–404.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.067>
54. Zhang, L., Lou, Y., & Schutyser, M. A. I. (2018a). 3D printing of cereal-based food structures containing probiotics. *Food Structure*, 18, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2018.10.002>
55. Zhang, L., Lou, Y., & Schutyser, M. A. I. (2018b). 3D printing of cereal-based food structures containing probiotics. *Food Structure*, 18, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2018.10.002>