



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



INSTITUTO DE INGENIERÍA DE
ALIMENTOS PARA EL DESARROLLO

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para
el Desarrollo

Relación entre la printabilidad de geles y sus propiedades
reológicas y texturales.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ciencia e Ingeniería de los Alimentos

AUTOR/A: Latorre Aguilar, Laura

Tutor/a: Martínez Monzó, Javier

Cotutor/a: García Segovia, Purificación

Director/a Experimental: MATAS GIL, ADRIAN

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

ESTUDIO SOBRE LA PRINTABILIDAD DE GELES PARA LA IMPRESIÓN 3D DE ALIMENTOS

Laura Latorre Aguilar, Adrián Matas Gil¹, Marta Igual Ramo¹, Purificación García Segovia¹, Javier Martínez Monzó¹.

RESUMEN

La impresión 3D de alimentos está presente en muchos sectores, aunque se produce un gran interés dentro de la industria alimentaria, un ejemplo de ello es la nutrición personalizada o el uso de biomateriales alimentarios. Es conveniente conocer la printabilidad de esos biomateriales, es decir, la capacidad de manipular el material y mantener su estructura durante y después del proceso de impresión. Este trabajo busca establecer relaciones entre las propiedades reológicas y texturales para la predicción de la printabilidad y una posterior comprobación de la misma, mediante el análisis de imagen. Se elaboraron tres geles de gelatina porcina más carragenato iota (Gp+I), de gelatina bovina más carragenato kappa (Gb-K) y de metilcelulosa (MC). Los tres geles presentan un comportamiento predominantemente elástico. Los geles Gp+I y Gb-K podrían alcanzar una altura máxima de 1 cm y el MC únicamente solo de una capa. El gel que presenta una mayor resistencia es el gel MC. El Gp+I de 1 cm presenta los valores más altos en todos los parámetros reológicos, excepto en adhesividad. El gel Gb-K se asemeja en mayor medida tanto en la altura como en el área a los valores teóricos.

PALABRAS CLAVE: Impresión 3D, geles, carragenato-iota, carragenato-kappa, metilcelulosa, reología, extrusión, TPA, imagen.

RESUM

La impressió 3D d'aliments és present en molts sectors, encara que es produeix un gran interès dins de la indústria alimentària, un exemple d'això és la nutrició personalitzada o l'ús de biomaterials alimentaris. És convenient conèixer la printabilitat d'aqueixos biomaterials, és a dir, la capacitat de

¹ Food Investigation and Innovation Group, Food Technology Department, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain;

manipular el material i mantindre la seua estructura durant i després del procés d'impressió. Aquest treball busca establir relacions entre les propietats reològiques i texturals per a la predicció de la printabilidad i una posterior comprovació d'aquesta, mitjançant l'anàlisi d'imatge. Es van elaborar tres gels de gelatina porcina més carragenato iota (Gp+I), de gelatina bovina més carragenato kappa (*Gb-K) i de metilcelulosa (MC). Els tres gels presenten un comportament predominantment elàstic. Els gels Gp+I i Gb-K podrien aconseguir una altura màxima d'1 cm i el MC únicament només d'una capa. El gel que presenta una major resistència és el gel MC. El Gp+I d'1 cm presenta els valors més alts en tots els paràmetres reològics, excepte en adhesivitat. El gel Gb-K s'assembla en major mesura tant en l'altura com en l'àrea als valors teòrics.

PARAULES CLAU: Impressió 3D, gels, carragenato-iota, carragenato-kappa, metilcelulosa, reologia, extrusió, TPA, imatge.

ABSTRACT

3D printing of food is present in many sectors, although there is great interest within the food industry, an example of this is personalized nutrition or the use of food biomaterials. It is convenient to know the printability of these biomaterials, that is, the ability to manipulate the material and maintain its structure during and after the printing process. This work seeks to establish relationships between rheological and textural properties for the prediction of printability and its subsequent verification, through image analysis. Three gels were made of porcine gelatin plus iota carrageenan (Gp+I), bovine gelatin plus kappa carrageenan (Gb-K) and methylcellulose (MC). The three gels present a predominantly elastic behavior. The Gp+I and Gb-K gels could reach a maximum height of 1 cm and the MC only one layer. The gel with the highest resistance is the MC gel. The 1 cm Gp+I presents the highest values in all the rheological parameters, except in adhesiveness. The Gb-K gel more closely resembles both in height and in area the theoretical values.

KEYWORDS: 3D printing, gels, iota-carrageenan, kappa-carrageenan, methylcellulose, rheology, extrusion, TPA, image.

INTRODUCCIÓN

La impresión 3D, se conoce también como prototipado rápido, ofrece la posibilidad de crear objetos tridimensionales mediante un modelo informático (Dankar et al. 2018). Es un proceso de fabricación que construye formas complejas sólidas (o semisólidas) mediante una construcción capa a capa (Tejada et al. 2022).

Posee interés para investigadores, industria y público de diversos campos de aplicaciones, como son la medicina, la gastronomía, la ingeniería, la manufactura, el arte y la educación. Concretamente, para la industria alimentaria, el interés se basa en la simplificación de la cadena de suministro y la reducción de los costes de almacenamiento, en la ampliación del uso de los materiales alimentarios para el diseño y la nutrición personalizados, entre otros (Tejada et al. 2022).

Cabe la posibilidad real de que, en un futuro, se elaboren productos alimenticios en masa con características de diseño, sabores y colores diversos. También con estructuras geométricas, texturas y perfiles nutricionales específicos, incluso que se produzcan en los propios hogares (Pereira et al. 2021).

Actualmente, existen varios biomateriales que se utilizan para la impresión 3D, como son la masa de galletas (Pulatsu et al. 2020), el chocolate (García, 2019), puré de patata (Liu et al. 2020), pasta de tomate (Zhu et al. 2019), pan para celíacos (Matas, 2021), crema de almendra (Blasco, 2020), etc. Aunque sería interesante investigar la incorporación de más formulaciones que posean buenas características, como comportamiento de flujo, densidad, viscosidad y/o tasa de corte. Es decir, con buena printabilidad (Varvara et al. 2021).

El concepto de printabilidad está asociado a la capacidad de manipular el material y mantener su estructura durante y después del proceso de impresión. Por tanto, con la alta printabilidad se consiguen obtener objetos y formas de mayor complejidad geométrica. Sin embargo, todavía no se ha conseguido cuantificar la capacidad de impresión, debido a la influencia de diversos factores, como la temperatura, los componentes, los aditivos, etc (Kim et al. 2017).

Varios estudios han mostrado que obteniendo ciertos valores reológicos y texturales se pueden preparar formulaciones de geles que dan lugar a figuras impresas en 3D con gran printabilidad (Cao et al. 2022; García, 2020). Incluso, en algunos de ellos, se han utilizado hidrocoloides, como material de

referencia, por su capacidad para simular la printabilidad de varios tipos de aplicaciones alimentarias. Como, por ejemplo, para la creación de productos destinados a personas con disfagia (Pant et al. 2021; Kim et al. 2017).

El objetivo de este trabajo consiste en establecer relaciones entre las propiedades tanto reológicas como texturales para la predicción de la printabilidad de tres geles formados por gelatina porcina más carragenato iota (Gp+I), gelatina bovina más carragenato kappa (Gb-K) y metilcelulosa (MC). Así como la posterior comprobación de la predicción mediante la impresión de los tres geles para formar un cilindro de 3 cm de diámetro y 1, 2 y 3 cm de alto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materias primas

Para la preparación de los geles, todos los hidrocoloides: gelatina porcina y bovina, metilcelulosa, carragenato iota y kappa, fueron suministrados por la empresa Sosa (Sosa Ingredients, Moia, España).

Elaboración de geles

Los geles se preparan de forma muy similar. Por ejemplo, la gelatina bovina más carragenato-k (Gb+K), se preparó con una disolución en agua al 4% de Gb y una de 0,5% de k. El volumen total de agua se separó en dos, una parte se llevó a 65°C para disolver la gelatina y otra a 75°C para el carragenato-k, mediante placas calefactoras con agitación. Una vez disueltas se juntaron las disoluciones y se añadió 1 g de colorante rojo con el fin de mejorar visualmente la diferenciación de las capas. Esta mezcla fue introducida en una jeringuilla y dejó enfriar durante 1 hora para más tarde introducirla en nevera a 4°C durante 30 min. La muestra se dejó atemperar hasta 25°C previamente a su uso.

Para preparar el gel de gelatina porcina más carragenato iota (Gp+I) se realizó una disolución en agua al 5% de gelatina porcina a 65°C y otra disolución con un 2% de carragenato-I a 75°C, las cuales se juntaron y se añadió 1g de colorante y se homogeneizó. Durante una hora y media se mantuvo esta mezcla a temperatura ambiente, seguida de otra media hora en

refrigeración a 4°C más un tiempo a temperatura ambiente para que la mezcla se atempere hasta alcanzar los 25°C.

Por último, el gel de metilcelulosa (MC) se elaboró con una única disolución al 4% de metilcelulosa en un 96% de agua a temperatura ambiente. Una vez disuelto y añadido el colorante guardó en las jeringuillas durante 12-24 horas a una temperatura de 4°C y se atemperó hasta los 25°C antes de su uso para la impresión.

Impresión 3D

Se ha utilizado una impresora 3D comercial (BCN 3D+, BCN3D Technologies, Barcelona, España) provista de un sistema de extrusión de jeringuilla y un sistema de posicionamiento X-Y-Z, con un motor paso a paso. Contiene una jeringuilla utilizada para materiales alimentarios y una boquilla de impresión de 1,63 mm de diámetro.

Para poder realizar la impresión primero se diseñó la forma y dimensiones de la figura deseada. Mediante el programa Tinkercad (Tinkercad, software gratuito, Autodesk, Inc., San Rafael, California, EE. UU.) se crearon cilindros de 1, 2 y 3 cm de altura con un diámetro de 3 cm y se exportó el archivo en STL. Estos archivos se introdujeron en el programa Slic3r (Slic3r, software gratuito, desarrollado por Alessandro Ranellucci), el cuál controla las condiciones de impresión para cada capa, como el espesor, la altura de la aguja, la velocidad de impresión, etc. Además, se obtuvieron los archivos g.code para su impresión.

La impresión se llevó a cabo a temperatura ambiente (25°C), con velocidad de extrusión de 20 mm/s, diámetro de la boquilla de 1,63 mm, al igual que la altura de capa y una densidad de relleno del 100% con disposición rectilínea. La impresión se realizó sobre un soporte plástico blanco para facilitar el posterior análisis de imagen.

Análisis de muestras

CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS

Las propiedades reológicas se estudiaron en un reómetro Kinexus Pro+ (Malvern Instruments, Worcesterchire, Reino Unido), mediante el software informático rSpace, para los tres tipos de geles (Gp+I, Gb-K y MC).

A estas muestras se les aplicó un ensayo RLV, con el fin de conseguir que el posterior ensayo oscilatorio se presentara dentro de la región lineal viscoelástica. A continuación, se realizó el ensayo oscilatorio placa a placa, con un accesorio de 40mm de diámetro. Las características del ensayo fueron: rango de frecuencia de 0,1 a 10 Hz, esfuerzo de 1 Pa y una temperatura de 25°C, con éstas se pudo caracterizar el comportamiento viscoelástico de los geles.

A partir de los datos obtenidos en los ensayos se obtuvo el valor del módulo elástico o de almacenamiento (G') que representa el componente elástico de la masa, el módulo viscoso o de pérdida (G''), que simboliza el comportamiento viscoso de la muestra, el módulo complejo (G^*), que consiste en la resistencia total de una sustancia frente a la deformación aplicada, la tangente del ángulo de fase o de pérdidas ($\tan \delta$), que muestra la razón entre la componente viscosa y elástica presentada por la masa. Los resultados se analizaron a partir del promedio de tres réplicas realizadas a cada gel.

CARACTERIZACIÓN TEXTURAL

Para el análisis de la textura se estudiaron dos aspectos: la capacidad de extrusión de los geles previos a la impresión (jeringuillas cargadas) y la caracterización de las propiedades mecánicas de alimentos mediante análisis de perfil de textura (TPA) de las muestras impresas. Ambas se analizaron con un texturómetro TA.XT.plus (Stable Micro Systems, Godalming, Surrey, UK) y el programa Texture Exponent 32.

El análisis de la capacidad de extrusión de los geles consistió en simular la velocidad de bajada del pistón del extrusor y así calcular la fuerza que utiliza la impresora para extrusionar.

Se utilizó una jeringuilla de 100mL de volumen y un pistón de 31 mm de diámetro. Se llenaron 3 jeringuillas con cada una de las muestras estudiadas y se extruyeron a través de la aguja de 1,63mm de diámetro. Los parámetros utilizados en el ensayo fueron la velocidad de bajada del pistón a 0,04 mm/s, y la distancia de bajada de 10mm.

Durante el proceso de extrusión se obtuvieron las curvas de fuerza frente al tiempo, en las que se visualizan los diferentes periodos que atraviesa la muestra y los valores de fuerza máxima y media. La curva se caracteriza por 3 etapas: con la primera (1-2) se halla la pendiente de la curva, en la segunda (2-3) se observa el tiempo que tarda la fuerza en llegar a su punto máximo y en la última (3-4) se obtiene la estabilización de la fuerza, es decir, se obtiene la fuerza media de la muestra. Un ejemplo de ello se muestra en la Figura 1.

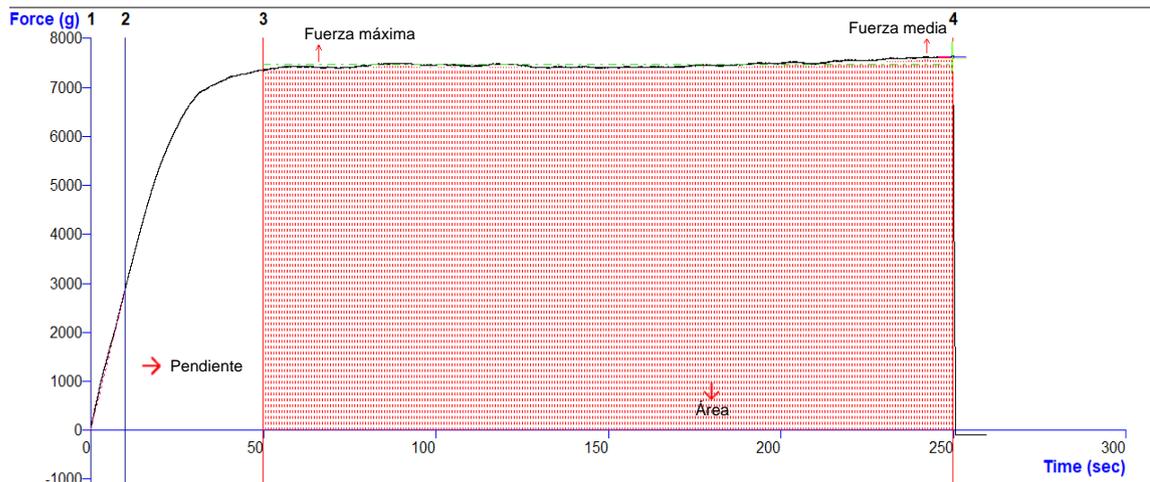


FIGURA 1. Curva de fuerza frente al tiempo del gel Gp+I.

El ensayo TPA consiste en la compresión de forma uniaxial de un émbolo dos veces consecutivas, simulando el movimiento que realiza la mandíbula durante la masticación. Esa compresión se realizó mediante una placa circular de 4 cm de diámetro y con una deformación del gel del 40%.

A partir de los ensayos del TPA se obtuvieron los parámetros: fragilidad o fuerza del primer pico, dureza o fuerza máxima, cohesividad o relación de áreas (de los dos ciclos de compresión), adhesividad o área de fuerza negativa, elasticidad, gomosidad, y masticabilidad.

ANÁLISIS DE IMAGEN

Se tomaron fotografías de la vista frontal y superior de los geles, inmediatamente después de su impresión, mediante una cámara digital a color (mod Alpha 330, Sony, Tokio, Japón). Estas imágenes se analizaron con el programa Image J (ImageJ, NIH, Washington, DC, USA) con el fin de medir la altura por la vista frontal y el área de los cilindros por la vista superior, mostrado en la Figura 2. Estos valores se compararon con los introducidos en el programa Slic3r (3 cm de diámetro y 1, 2 o 3 cm de altura) y se calculó la diferencia entre ellos.

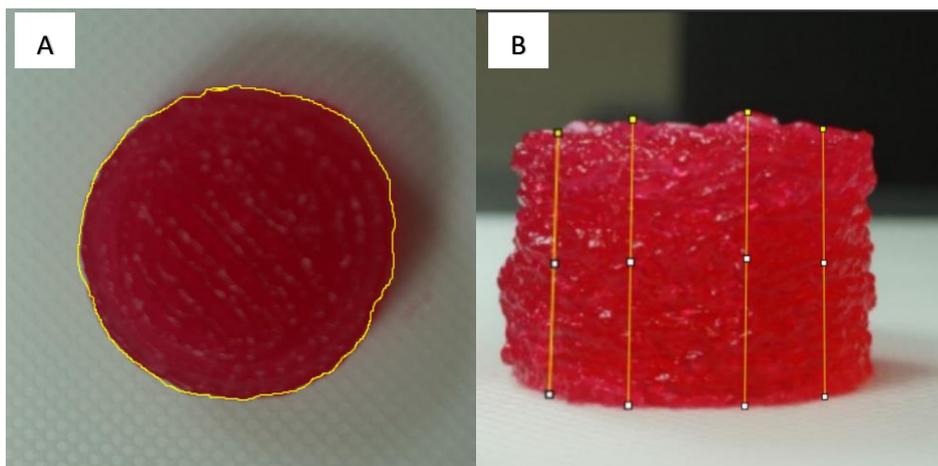


FIGURA 2. Vista frontal y superior de los cilindros de dos geles, mediciones de A) Área del gel Gp-I, B) Altura del gel Gb-K.

Para calcular las diferencias entre la altura teórica y la obtenida (Δh) y el área teórica y la obtenida ($\Delta \text{área}$) se emplearon las siguientes ecuaciones 1 y 2, respectivamente:

$$\Delta h = \frac{h_{\text{obtenida}} - h_{\text{teórica}}}{h_{\text{teórica}}} * 100 \quad (1)$$

$$\Delta \text{área} = \frac{\text{área}_{\text{obtenida}} - \text{área}_{\text{teórica}}}{\text{área}_{\text{teórica}}} * 100 \quad (2)$$

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Una vez obtenidos los resultados de los diferentes parámetros estudiados, se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) con un intervalo de confianza del 95% ($p < 0,05$), para así comparar y evaluar las diferencias significativas entre los tres geles. Este análisis se llevó a cabo mediante el programa Statgraphics Centurion 18-X64, versión 18.1.13 (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, VA, USA). El método empleado para discriminar entre las medias obtenidas es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características reológicas

De acuerdo con los estudios realizados por Godoi et al. (2016), sobre las tecnologías de impresión 3D aplicadas al diseño de alimentos, la capacidad de impresión de los materiales blandos, como son los geles, por extrusión depende mayoritariamente de las propiedades reológicas de los materiales.

Con el ensayo reológico oscilatorio podemos analizar el comportamiento de los geles, y así determinar si predomina la componente elástica o viscosa. Si la muestra es elástica el esfuerzo y la deformación están en fase ($\delta \approx 0^\circ$), G^* será similar a G' y G'' estará alrededor de 0. En el caso, si la masa es viscosa estarán en desfase ($\delta \approx 90^\circ$), G^* se parecerá a G'' y G' estará cercana a 0. Por último, si es viscoelástica, δ estará entre 0 y 90° , siendo δ igual a 45° y no predomina ninguna característica, al igual que con una $\tan \delta$ igual a 1 (Talens, s.f.).

En la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros obtenidos en el ensayo oscilatorio a 1 Hz para cada uno de los geles estudiados. Los tres geles muestran unos valores elevados del módulo elástico (G') y del módulo complejo (G^*), siendo estos valores semejantes entre ellos. Estos resultados junto con el valor de la $\tan \delta$ menor a 1 indica que los tres geles presentan un comportamiento predominantemente elástico.

TABLA 1. Valores de los parámetros obtenidos en el ensayo oscilatorio.

Muestra	G^* (Pa)	G' (Pa)	G'' (Pa)	$\tan \delta$	η^* (Pa·s)
Gb-K	894 (15) ^b	855 (15) ^b	125 (2) ^b	0,1418 (0,0007) ^a	142 (2) ^b
Gp+l	978 (58) ^c	964 (59) ^c	159 (4) ^c	0,165 (0,007) ^b	156 (9) ^c
MC	244 (17) ^a	244 (17) ^a	84 (5) ^a	0,367 (0,005) ^c	39 (3) ^a

^{a,b,c}: Los valores dentro de una misma columna que sus superíndices sean diferentes significa que son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) según la prueba de rango múltiple

Asimismo, en esta Tabla 1 los parámetros obtenidos mostraron diferencias significativas entre los geles en todos sus parámetros ($p < 0.05$).

Las tres muestras presentan valores de G' y G'' en el rango de 100 Pa y 10000 Pa, a excepción del módulo viscoso de MC, que como muestra la Tabla 1 posee un valor inferior a 100 Pa. Y todas ellas poseen una viscosidad de entre 10 Pa·s y 1000 Pa·s, y presentan el comportamiento pseudoplástico requerido frente al esfuerzo cortante, debido a que, al aumentar la frecuencia, la viscosidad aparente disminuye. Estos valores son similares a los observados en otros estudios como el de Zhang et al. (2021) en el que mostraron los valores entre 100 y 10000 Pa permiten una impresión correcta de los alimentos.

Según Lille et al., (2018) para que el material fluya a través de una boquilla pequeña su viscosidad debe tomar valores suficientemente bajos a altas velocidades de corte. A su vez, en reposo requiere una recuperación rápida de altas viscosidades para soportar la estructura al ser depositada durante la impresión. Zhu et al. (2019), expone que la viscosidad a velocidad de cizallamiento cero, o la viscosidad en reposo, indica la resistencia a la deformación bajo carga a largo plazo y, por lo tanto, podría esperarse que esté correlacionada con la estabilidad de la forma impresa.

Mediante esta prueba reológica se puede ayudar a detectar de forma rápida y fiable la estabilidad de la estructura alimentaria impresa en 3D y así conocer la idoneidad de la masa utilizada para la impresión. En este trabajo se buscaba realizar una predicción de la estabilidad del biomaterial para, posteriormente, comprobarlo mediante el análisis de imagen. Liu et al. (2018, 2019), Lille et al. (2017) y Chen et al. (2019) observaron que a mayor límite elástico y módulo de almacenamiento los biomateriales de impresión son más rígidos y se deforman en menor proporción. Aunque mediante los datos presentados en el trabajo de Nijdam et al. (2021) se pudo observar que esos parámetros no reflejaban completamente la rigidez del material y, por tanto, su estabilidad. En este trabajo se estudian dos tipos de deformaciones: la instantánea y la que se produce al cabo del tiempo, según el tipo de biomaterial utilizado. Los cilindros que están formados por almidón de trigo sufren una deformación instantánea, mientras que los que están formados por hidroxipropilmetilcelulosa al 10% su deformación dependía de la variable tiempo.

Para realizar la predicción de la estabilidad, teniendo en cuenta la altura máxima de los cilindros, se han analizado los datos obtenidos mediante el ensayo oscilatorio y el cálculo de la densidad de las mismas. Este resultado se obtuvo de la ecuación dada por Nijdam et al. (2021) y representa la altura máxima a la que se deberían imprimir las figuras para obtener una deformación del 5% en una hora. Tanto para G_p+I como para G_b-K la altura ideal sería 1cm, debido a que su altura máxima estaría entorno al 0,77 cm y 1cm, respectivamente. En cambio, para el gel MC simplemente se podría imprimir una capa, ya que su altura sería de 0,008 cm.

Caracterización textural

EXTRUSIÓN

Se evaluó la fuerza máxima con la que extrusiona la impresora para los diferentes geles. En la Tabla 2 se muestran los valores medios de la Fuerza máxima (N) y de la Fuerza media (N), a una temperatura controlada de 25°C. Una mayor fuerza máxima de un gel implica que éste posee una mayor resistencia a ser extruido y el valor de la fuerza media permite conocer parte de la estructura de la muestra estudiada.

TABLA 2. Valores de la fuerza máxima y media de los tres geles estudiados

Muestra	Fuerza máxima (N)	Fuerza media (N)
Gp+I	51 (10) ^a	50 (10) ^a
Gb-K	45 (9) ^a	38 (9) ^a
MC	77 (12) ^b	75 (12) ^b

^{a,b}: Los valores dentro de una misma columna que sus superíndices sean diferentes significa que son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) según la prueba de rango múltiple

En ambos parámetros el valor más elevado pertenece al gel MC y el valor mínimo pertenece al gel Gb-K. Además, cabe destacar que no se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los geles Gp+I y Gb-K, aunque los valores de Gp+I fueron ligeramente mayores en ambos parámetros.

Según Kim et al. 2017, la fuerza requerida por la impresora para extruir las muestras aumenta cuando se disminuye el tamaño de abertura de la boquilla y aumenta los diámetros del depósito, si se mantiene la misma velocidad de extrusión.

A lo largo del ensayo en algunas de las gráficas han aparecido pequeñas caídas de fuerza, las cuales pueden deberse a la presencia de burbujas de aire que pudiesen haberse quedado en el interior de los geles o de microrroturas. Los cuales aparecen en las últimas repeticiones de los geles, que podría ser consecuencia del movimiento ascendente de las burbujas por la jeringuilla. De manera visual se observó que el gel que presentaba un mayor número de burbujas o microrroturas pertenecía al Gb-K esta afirmación se evidencia mediante la Tabla 2, debido a que es el gel que presenta una mayor diferencia entre su fuerza máxima y media.

Por otro lado, en unas pocas aparecen unos picos de fuerza, representados con una pendiente ascendente seguida de una descendiente. Una hipótesis de estos sucesos es el aumento de la presión de extrusión debido a la aparición de sólidos por el colorante o el polvo mal disueltos que obstruyen ligeramente la boquilla. En la Figura 3 se muestran estas dos alteraciones, encontradas durante el análisis, de la curva de fuerza respecto del tiempo.

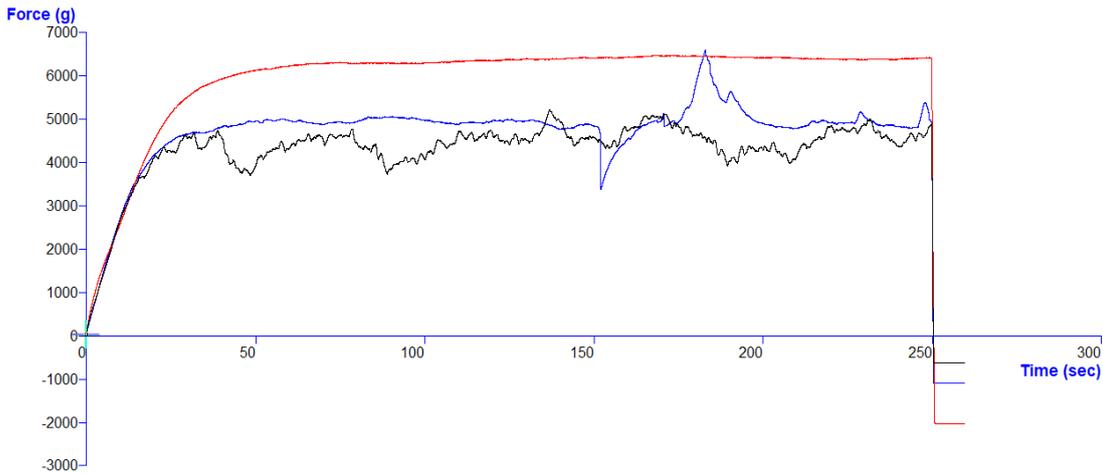


FIGURA 3. Representación gráfica de las curvas de extrusión de los tres geles estudiados (Gp+I, Gb-K y MC)

ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE ALIMENTOS MEDIANTE ANÁLISIS DE PERFIL DE TEXTURA (TPA)

El ensayo TPA fue realizado para los tres tipos de geles y para las tres alturas estudiadas. En la Tabla 3 se puede observar que la muestra que presenta los valores más altos en todos los parámetros es Gp+I 1cm y la menor en todos es Gb-K 3cm. A excepción del parámetro de adhesividad, en el cual no se cumple lo descrito anteriormente.

Estudios similares realizados con geles con zumo de limón (Yang et al. 2018) mostraron valores máximos y mínimos superiores, en cuanto a la dureza, cohesividad, elasticidad y pegajosidad, con respecto a los hallados con este estudio. Dichos rangos de valores son de 1,48-3,94 N, 0,65-0,94 g, 0,85-0,94 g, 9,98-379,74 g, respectivamente.

En el estudio de Azam et al. 2018 [19] se estudian la dureza, la elasticidad y la cohesividad de varias gomas (goma xantana, goma guar, goma k-carragenina y goma arábica), siendo sus resultados de 1,72-2,94 N, 0,75-0,9 g y 0,7-0,8 g, respectivamente. Los geles estudiados se encuentran por

debajo de estos valores de dureza y de cohesividad, en cambio, el valor mínimo del parámetro de elasticidad es inferior a 0,7 y el valor máximo coincide.

Analizando los geles y los parámetros por separado se observa que el valor medio más alto corresponde al parámetro de la dureza y al gel Gp-I. La dureza denota la fuerza requerida para que un material alimenticio alcance un cierto grado de deformación.

Mediante la relación entre la elasticidad y la cohesividad se puede entender la capacidad de estabilidad del gel, debido a que siempre va a ser menor el valor de la cohesividad. Aunque cuanto menor es la diferencia entre ambas, el gel después de un tratamiento mecánico puede recuperar su forma original sin sufrir algún daño. (Hernández et al. 2016). Mediante la relación entre estos dos parámetros en las 3 muestras impresas a 3 alturas, se ha podido observar que la muestra MC 2 cm sería el gel que posee mayor capacidad de estabilidad. A este gel le siguen las otras dos muestras de MC (1 y 3 cm), por lo que se podría suponer que ese este el gel más estable tras el tratamiento mecánico.

Por otro lado, mediante el análisis estadístico de este ensayo se han encontrado correlaciones entre los diferentes geles y alturas. Es decir, se han analizado 9 muestras, pero no se han identificado 9 muestras homogéneas. El parámetro que presenta una mayor diferencia ($p > 0,05$) entre todas las muestras es la elasticidad, la cual hace referencia a la capacidad de una muestra para volver a su forma original después de la deformación.

TABLA 3. Parámetros obtenidos mediante el ensayo TPA para cada uno de los geles a 1, 2 y 3 cm

Muestra	D (N)	A (N*s)	C	E	P (N)	M (N)	R
Gp+I1	1 (0,4) ^d	-0,8 (0,2) ^b	0,67 (0,07) ^e	0,88 (0,04) ^g	0,7 (0,3) ^c	0,6 (0,3) ^d	0,27 (0,08) ^c
Gp+I2	0,7 (0,2) ^{bc}	-1,2 (0,2) ^a	0,54 (0,03) ^d	0,78 (0,03) ^e	0,4 (0,1) ^b	0,31 (0,09) ^c	0,2 (0,03) ^b
Gp+I3	0,6 (0,1) ^b	-0,7 (0,2) ^{bc}	0,5 (0,1) ^c	0,64 (0,04) ^c	0,28 (0,05) ^{ab}	0,18 (0,04) ^{abc}	0,2 (0,03) ^b
Gb-K1	0,63 (0,09) ^b	-0,8 (0,4) ^b	0,55 (0,02) ^d	0,84 (0,04) ^{fg}	0,34 (0,04) ^b	0,29 (0,04) ^{bc}	0,1 (0,02) ^a
Gb-K2	0,7 (0,2) ^{ab}	-1,2 (0,2) ^{bc}	0,54 (0,03) ^b	0,78 (0,03) ^b	0,2 (0,05) ^{ab}	0,31 (0,09) ^{ab}	0,2 (0,03) ^a
Gb-K3	0,37 (0,03) ^a	-0,6 (0,2) ^c	0,28 (0,02) ^a	0,38 (0,03) ^a	0,105 (0,008) ^a	0,04 (0,003) ^a	0,08 (0,01) ^a
MC1	0,91 (0,07) ^{cd}	-1,14 (0,05) ^a	0,67 (0,01) ^e	0,84 (0,01) ^f	0,61 (0,05) ^c	0,51 (0,05) ^d	0,173 (0,008) ^b
MC2	0,55 (0,07) ^{ab}	-1,21 (0,03) ^a	0,59 (0,02) ^d	0,69 (0,03) ^d	0,32 (0,04) ^b	0,22 (0,04) ^{bc}	0,21 (0,01) ^b
MC3	0,5 (0,1) ^{ab}	-1,2 (0,2) ^a	0,54 (0,02) ^d	0,65 (0,05) ^c	0,29 (0,08) ^{ab}	0,19 (0,06) ^{abc}	0,22 (0,03) ^b

D = Dureza, A = Adhesividad, C = Cohesividad, E = Elasticidad, P = Pegajosidad, M = Masticabilidad, R = Resiliencia

a,b,c,d,e,f,g: Los valores dentro de una misma columna que sus superíndices sean diferentes significa que son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) según la prueba de rango múltiple

Análisis de imagen

Para poder establecer la presión de impresoras 3D de alimentos, para la creación de las estructuras tridimensionales deseadas, se requiere la determinación de ciertos parámetros como son el área, la longitud y los diámetros interno y externo (Mantihal et al. 2017).

En este estudio se ha analizado la vista frontal de los cilindros, para obtener la altura tras la impresión de cada uno de ellos, y la vista superior, para conocer el área de los mismos. En la Figura 4 se observan tres de los nueve tipos de cilindros.

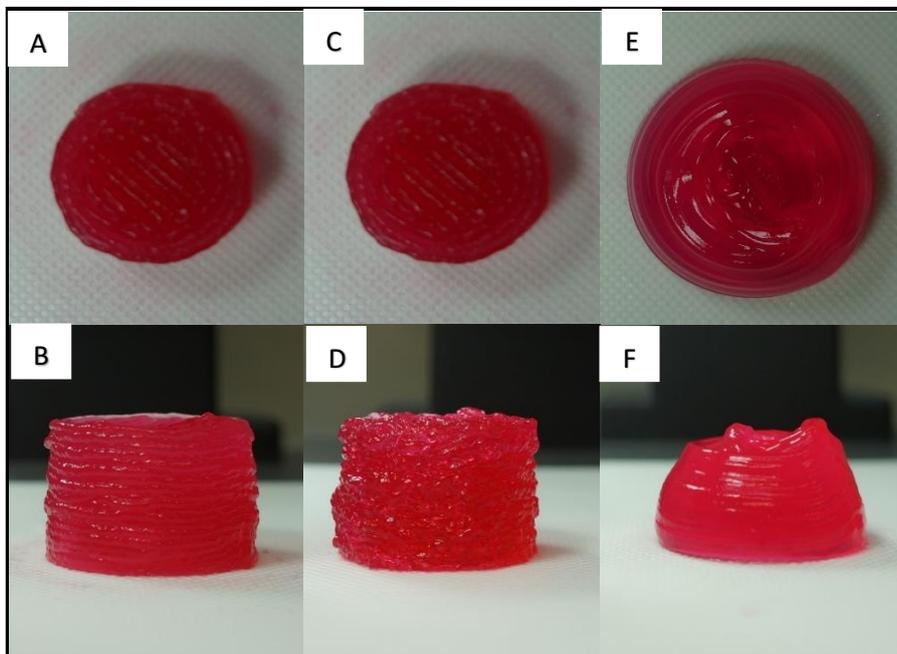


FIGURA 4. Representación de los tres tipos de geles con 3 cm de altura. La primera fila corresponde a las imágenes para el análisis del área de la figura y la segunda a la altura de la misma. A y B) Gel Gp+I, C y D) Gel Gb-K, E y F) Gel MC.

En la Tabla 4 se presentan los resultados tanto de las alturas y áreas medidas como del porcentaje de variación de dichos parámetros con respecto a los teóricos. Que el valor de los porcentajes sea positivo indica un incremento de dicho parámetro y, en caso contrario, que el valor sea negativo refleja una reducción.

Analizando la altura de los diferentes cilindros, se observa que el gel Gb-K es el que más se asemeja a la altura buscada, mientras que el gel MC es el menos similar. Para los geles de Gp+I y Gb-K la altura que menor variación sufre es la de 2 cm, esto no concuerda con lo esperado con el análisis reológico, en el que la altura máxima para dichos geles sería aproximadamente de 1 cm, aunque se debería que comprobarlo al cabo de una hora. Por su parte, el gel MC posee unas variaciones más elevadas en comparación con los otros geles, exceptuando MC1 cuya variación es similar a la de los otros geles.

Todos los geles excepto el MC1 y MC3 obtuvieron valores de área comprendidos entre 5,3 y 5,9 cm² y con una variación de entorno al 20%. La muestra MC1 es la más próxima al área esperada, siendo ésta de 7,07 cm², mientras que MC3 es la única que presenta un incremento del área, alcanzando un valor superior a los 8 cm². Una hipótesis que podría explicar este aumento de área es la gran reducción de altura que sufre esta última muestra que provocaría la expansión horizontal del cilindro, es decir, en lugar de las capas se sobrepongan creando un cilindro alargando, aumentan su extensión en el plano.

TABLA 4. Medidas obtenidas mediante el análisis de imagen para los tres tipos de geles a 1, 2 y 3 cm.

Muestra	h calculada (cm)	Δh	Área calculada (cm ²)	Δ área
Gp+I1	1,07 (0,08) ^a	7 (8) ^f	5,9 (0,5) ^{ab}	-17 (7) ^{ab}
Gp+I2	2,03 (0,07) ^c	2 (4) ^{ef}	5,7 (0,7) ^{ab}	-19 (10) ^{ab}
Gp+I3	2,7 (0,2) ^d	-9 (8) ^{bc}	5,7 (0,5) ^a	-20 (7) ^a
Gb-K1	0,95 (0,09) ^a	-5 (9) ^{cde}	5,3 (0,4) ^a	-24 (5) ^a
Gb-K2	2 (0,04) ^c	-0,2 (1,8) ^{ef}	5,5 (0,6) ^a	-22 (8) ^a
Gb-K3	2,95 (0,04) ^e	-1,6 (1,5) ^{de}	5,3 (0,8) ^a	-25 (11) ^a
MC1	0,92 (0,12) ^a	-8 (6) ^{cd}	7 (2) ^{bc}	-2 (32) ^{bc}
MC2	1,70 (0,13) ^b	-15 (6) ^b	5,5 (0,7) ^a	-22 (9) ^a
MC3	2 (0,2) ^c	-35 (7) ^a	8,1 (1,1) ^c	14 (16) ^c

a,b,c,d,e,f: Los valores dentro de una misma columna que sus superíndices sean diferentes significa que son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) según la prueba de rango múltiple

CONCLUSIONES

Las tres muestras presentan un comportamiento predominantemente elástico. Se ha realizado una predicción de la estabilidad, en cuanto a la altura máxima ideal para que al cabo de una hora solo se deforme el 5% de cada tipo de gel. El gel Gb-K y Gp+I deberían tener alturas de 1 cm y 0,77 cm, respectivamente, en cambio, la de MC debería ser de 0,008 cm.

Las fuerzas necesarias para imprimir los tres tipos de geles se encuentran en un rango de 45 y 80 N. Exactamente las muestras de Gp+I, Gb-K y MC poseen fuerzas máximas de 51, 45 y 77 N, respectivamente.

Analizando los geles mediante el reómetro se observa que el gel Gp+I de 1 cm muestra los valores más altos en todos los parámetros y el menor es del gel Gb-K de 3 cm, a excepción del parámetro de adhesividad.

El gel Gb-K se asemeja en mayor medida tanto en la altura como en el área a los valores teóricos, siendo la de 2 cm la más similar. Y el gel MC de 3 cm se podría considerar la peor muestra debido a que el incremento del área es del 14% y la altura disminuye en un 35%.

BIBLIOGRAFÍA

Azam, R. S., Zhang, M., Bhandari, B., & Yang, C. (2018). *Effect of different gums on features of 3D printed object based on vitamin-D enriched orange concentrate*. *Food Biophysics*, 13(3), 250-262.

Blasco Bell, P. E. (2020). *Impresión 3D de crema de almendras* [Trabajo final de grado]. Universitat Politècnica de València, España.

Cao, F., Chen, R., Li, Y., Han, R., Li, F., Shi, H., & Jiao, Y. (2022). Effects of NaCl and MTGase on printability and gelling properties of extrusion-based 3D printed white croaker (*Argyrosomus argentatus*) surimi. *LWT*, 113646.

Chen, H., Xie, F., Chen, L., & Zheng, B. (2019). *Effect of rheological properties of potato, rice and corn starches on their hot-extrusion 3D printing behaviors*. *Journal of Food Engineering*, 244, 150-158.

Chhabra, R. P., & Richardson, J. F. (2011). *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*. Butterworth-Heinemann.

- Dankar, I., Haddarah, A., Omar, F. E., Sepulcre, F., & Pujolà, M. (2018). 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration. *Trends in food science & technology*, 75, 231-242.
- Ernesto, L. (2016). Análisis de perfil de textura y caracterización de carrageninas para uso en productos cárnicos. *Revista Ciencias de la Salud*, 3(7), 1-5.
- García Ríos, C. A (2019). *Impresora 3D de chocolate*. Universidad Distrital Bogotá, Colombia.
- García-Segovia, P., García-Alcaraz, V., Balasch-Parisi, S., & Martínez-Monzó, J. (2020). *3D printing of gels based on xanthan/konjac gums*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64, 102343.
- 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.
- Kim, H. W., Bae, H., & Park, H. J. (2017). *Classification of the printability of selected food for 3D printing: Development of an assessment method using hydrocolloids as reference material*. *Journal of Food Engineering*, 215, 23-32.
- Lille, M., Nurmela, A., Nordlund, E., Metsä-Kortelainen, S., & Sozer, N. (2018). *Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing*. *Journal of Food Engineering*, 220, 20-27.
- Liu, Z., Bhandari, B., & Zhang, M. (2020). *Incorporation of probiotics (Bifidobacterium animalis subsp. Lactis) into 3D printed mashed potatoes: Effects of variables on the viability*. *Food Research International*, 128, 108795.
- Liu, Z., Bhandari, B., Prakash, S., Mantihal, S., & Zhang, M. (2019). *Linking rheology and printability of a multicomponent gel system of carrageenan-xanthan-starch in extrusion based additive manufacturing*. *Food Hydrocolloids*, 87, 413-424.
- 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.
- Mantihal, S., Prakash, S., Godoi, F. C., & Bhandari, B. (2017). *Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling*. *Innovative food science & emerging technologies*, 44, 21-29.
- Matas Gil, A. (2021). *Aplicación de la impresión 3d en el diseño de pan funcional para celíacos* [Trabajo fin de máster]. Universitat Politècnica de València, España.

- Nijdam, J. J., LeCorre-Bordes, D., Delvart, A., & Schon, B. S. (2021). *A rheological test to assess the ability of food inks to form dimensionally stable 3D food structures*. *Journal of Food Engineering*, 291, 110235.
- Pant, A., Lee, A. Y., Karyappa, R., Lee, C. P., An, J., Hashimoto, M., ... & Zhang, Y. (2021). *3D food printing of fresh vegetables using food hydrocolloids for dysphagic patients*. *Food Hydrocolloids*, 114, 106546.
- Pereira, T., Barroso, S., & Gil, M. M. (2021). *Food texture design by 3D printing: A review*. *Foods*, 10(2), 320.
- Pulatsu, E., Su, J. W., Lin, J., & Lin, M. (2020). *Factors affecting 3D printing and post-processing capacity of cookie dough*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 61, 102316.
- Talens Oliag, P. (s.f). *Caracterización del comportamiento viscoelástico de un alimento mediante un ensayo oscilatorio*. Universitat Politècnica de València, España.
- Tejada-Ortigoza, V., & Cuan-Urquiza, E. (2022). *Towards the Development of 3D-Printed Food: A Rheological and Mechanical Approach*. *Foods*, 11(9), 1191.
- Varvara, R. A., Szabo, K., & Vodnar, D. C. (2021). *3D food printing: Principles of obtaining digitally-designed nourishment*. *Nutrients*, 13(10), 3617.
- Yang, F., Zhang, M., Bhandari, B., & Liu, Y. (2018). *Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters*. *Lwt*, 87, 67-76.
- Zhang, J. Y., Pandya, J. K., McClements, D. J., Lu, J., & Kinchla, A. J. (2021). *Advancements in 3D food printing: a comprehensive overview of properties and opportunities*. In *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Bellwether Publishing, Ltd.
- Zhu, S., Stieger, M. A., van der Goot, A. J., & Schutyser, M. A. (2019). *Extrusion-based 3D printing of food pastes: Correlating rheological properties with printing behaviour*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 58, 102214.