



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



INSTITUTO DE INGENIERÍA DE  
ALIMENTOS PARA EL DESARROLLO

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

## FORMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS Y DIGESTIVAS DE UNA CREMA DE CHAMPIÑONES ENRIQUECIDA EN PROTEÍNA Y CON TEXTURA MODIFICADA

TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA E  
INGENIERÍA DE LOS ALIMENTOS

ALUMNA: Kaouther Benzama

TUTORES ACADÉMICOS: Pau Talens Oliag  
Raúl Grau Meló

TUTORAS EXPERIMENTALES: Marta Gallego Ibáñez  
Susana Ribes Llop

*Curso Académico: 2020-2021*  
**VALENCIA, septiembre 2021**

# FORMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS Y DIGESTIVAS DE UNA CREMA DE CHAMPIÑONES ENRIQUECIDA EN PROTEÍNA Y CON TEXTURA MODIFICADA

Benzama, Kaouther<sup>1</sup>; Gallego Ibáñez, Marta<sup>1</sup>; Ribes Llop, Susana<sup>1</sup>; Grau Meló, Raúl<sup>1</sup>, Talens Oliag, Pau<sup>1</sup>

## RESUMEN

En el presente trabajo se evaluaron las propiedades reológicas, viscoelásticas y la digestibilidad proteica de una crema de champiñones enriquecida con proteína y con textura modificada. La crema fue enriquecida con proteína lactosérica (WPC), gelatina bovina (GB), o sus hidrolizados proteicos, mientras que su textura se modificó usando carboximetilcelulosa (CMC) o almidón modificado (AM). Todas las muestras presentaron un comportamiento de flujo plástico, mostrando umbral de fluencia. La crema WPC - AM mostró el umbral de fluencia más alto, sugiriendo un mayor empaquetamiento de las partículas, mientras que la muestra GB - AM presentó mayor rigidez, fuerza del gel y resistencia al flujo. Sin embargo, todas las cremas mostraron un comportamiento de gel débil, considerándose apropiadas para personas mayores durante el proceso de deglución. Respecto a la digestión gastrointestinal, se observó que la viscosidad aparente y el índice de consistencia disminuyeron a lo largo del proceso, debido principalmente a la acción enzimática durante las fases oral y gástrica y al efecto dilución en la etapa intestinal. Las muestras WPC - AM y GB - AM fueron las más afectadas a nivel reológico por las condiciones gastrointestinales. Sin embargo, la digestibilidad proteica de estas muestras no se vio comprometida, sino que fueron las muestras con hidrolizados proteicos y CMC las que presentaron una menor digestibilidad.

**PALABRAS CLAVE:** alimento enriquecido, hidrocoloides, reología, viscoelasticidad, digestión gastrointestinal *in vitro*.

## RESUM

En el present treball es van avaluar les propietats reològiques, viscoelàstiques i la digestibilitat proteica d'una crema de xampinyons enriquida amb proteïna i amb textura modificada. La crema va ser enriquida amb proteïna lactosèrica (WPC), gelatina bovina (GB), o els seus hidrolitzats proteics, mentre que la seua textura es va modificar utilitzant carboximetilcelulosa (CMC) o midó modificat (AM). Totes les mostres van presentar un comportament de flux plàstic, mostrant llindar de fluència. La crema WPC - AM va mostrar el llindar de fluència més alt, suggerint un major

<sup>1</sup>Departamento de Tecnología de Alimentos, Universitat Politècnica de València. España

empaquetatge de les partícules, mentre que la mostra GB - AM va presentar major rigidesa, força del gel i resistència al flux. No obstant això, totes les cremes van mostrar un comportament de gel dèbil, considerant-se apropiades per a persones majors durant el procés de deglució. Respecte a la digestió gastrointestinal, es va observar que la viscositat aparent i l'índex de consistència van disminuir al llarg del procés, degut principalment a l'acció enzimàtica durant les fases oral i gàstrica i a este efecte dilució en l'etapa intestinal. Les mostres WPC - AM i GB - AM van ser les més afectades nivell reològic per les condicions gastrointestinals. No obstant això, la digestibilitat proteica d' aquestes mostres no es va veure compromesa, sinó que van ser les mostres amb hidrolitzats proteics i CMC les que van presentar una menor digestibilitat.

PARAULES CLAU: aliment enriquit, hidrocoloids, reologia, viscoelasticitat, digestió gastrointestinal *in vitro*.

## ABSTRACT

In the present work, the rheological, viscoelastic, and protein digestibility properties of a mushroom cream enriched with protein and with modified texture were evaluated. The cream was enriched with whey protein (WPC), bovine gelatin (GB), or their protein hydrolysates, while its texture was modified using carboxymethylcellulose (CMC) or modified starch (AM). All samples presented a plastic flow behavior, showing yield point. The WPC - AM cream showed the highest yield point, suggesting a higher packing of the particles, while the GB - AM sample showed higher stiffness, gel strength, and resistance to flow. However, all the creams showed a weak gel behavior, being considered appropriate for the elderly during the swallowing process. Regarding gastrointestinal digestion, it was observed that the apparent viscosity and the consistency index decreased throughout the process, mainly due to the enzymatic action during the oral and gastric phases and to the dilution effect in the intestinal stage. The WPC - AM and GB - AM samples were the most affected at the rheological level by gastrointestinal conditions. However, the protein digestibility of these samples was not compromised, but the samples with protein hydrolysates and CMC presented lower digestibility.

KEYWORDS: enriched food, hydrocolloids, rheology, viscoelasticity, *in vitro* gastrointestinal digestion.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los cambios demográficos observados en Europa durante las últimas décadas, en particular el aumento de la esperanza de vida, han incrementado los esfuerzos de los diferentes países para garantizar la calidad de vida de las personas mayores (Ahmed y Haboubi, 2010). El envejecimiento de la población conlleva necesidades nutricionales específicas debido a los cambios fisiológicos de los individuos, siendo la dieta un factor esencial para mantener unas condiciones de salud adecuadas. En este sentido, cabe remarcar que los requerimientos de proteínas aumentan en las personas mayores y que los productos diseñados para este grupo de personas deben ser masticados y deglutidos con facilidad (Satusap et al., 2014; Suebsaen et al., 2019). Por lo tanto, el desarrollo de alimentos enriquecidos y con textura modificada podría ayudar a establecer una dieta enriquecida que satisfaga las necesidades de este grupo de personas. Sin embargo, el desarrollo de estos productos es todavía un gran desafío tecnológico. La selección de la formulación adecuada se basa en varios factores, como son las necesidades nutricionales de los pacientes, el estado y condiciones del sistema gástrico e intestinal y los atributos funcionales como la digestibilidad, bioaccesibilidad y la biodisponibilidad. Todo ello determina la calidad nutricional de la formulación (Srigiripura et al., 2019).

Para modificar la textura de los alimentos se suelen utilizar espesantes que forman una matriz que tiene la característica de fluir más lentamente que los líquidos regulares y también formar un bolo ligeramente más cohesivo, y por tanto más seguro para tragar (Kim et al., 2014). Los alimentos con textura modificada preparados con espesantes exhiben propiedades reológicas según la naturaleza del espesante, el medio de preparación, la concentración del espesante, la temperatura y el tiempo de preparación (Cho et al., 2015). En el presente trabajo se han utilizado carboximetilcelulosa y almidón modificado como espesantes. La carboximetilcelulosa es un polímero aniónico soluble en agua, extraído de la celulosa, mientras que el almidón es un polisacárido neutro presente de forma natural en las plantas, que es modificado para mejorar sus propiedades funcionales. Para enriquecer el producto, se ha trabajado con proteína lactosérica, caracterizada por su alto valor biológico, y gelatina de tejidos animales, que destaca por su alto contenido en glicina. A fin de evaluar posibles cambios en la matriz de estudio y en la asimilación proteica durante el proceso digestivo, se trabajó también con hidrolizados de ambas proteínas.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar las propiedades reológicas, viscoelásticas y de digestibilidad de una crema de champiñones enriquecida con proteína y con textura modificada diseñada para personas mayores. La crema fue enriquecida con proteína lactosérica, gelatina bovina, o sus hidrolizados proteicos, mientras que su textura se modificó usando carboximetilcelulosa o almidón modificado.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Materia prima y reactivos**

Los ingredientes para elaborar la crema de champiñones (champiñones, leche entera, agua y sal) se compraron en un supermercado local (Valencia, España).

Para enriquecer la crema se utilizaron 4 fuentes de proteína: concentrado de proteína lactosérica (WPC), gelatina bovina (GB), hidrolizado de proteína lactosérica (HD WPC) e hidrolizado de gelatina (HD GB). La proteína lactosérica fue proporcionada por Brenntag Química S.A.U. (Sevilla, España) y la gelatina bovina por Sigma Aldrich, Co. (St. Louis, MO, EEUU). Los hidrolizados se obtuvieron en el laboratorio a partir de la respectiva proteína, tal y como se describe en el punto 2.2 del presente trabajo.

Para modificar la textura de las cremas se utilizaron dos hidrocoloides distintos: almidón modificado (AM), proporcionado por Cargill (Martorell, España) y carboximetilcelulosa de sodio (CMC), proporcionada por EPSA (Valencia, España). Las enzimas  $\alpha$ -amilasa de páncreas porcino Tipo VI-B, pepsina gástrica porcina y pancreatina porcina, así como el extracto de bilis porcina, mucina tipo II de estómago porcino, colorante azul de Coomassie G-250, bifosfato de sodio, fosfato disódico, dodecilsulfato sódico (SDS), ácido trinitrobenzenosulfónico (TNBS), albúmina de suero bovina (BSA), L-tirosina, L-leucina y glucosa se adquirieron en Sigma-Aldrich, Co. (St. Louis, MO, USA). La enzima Protamex<sup>®</sup> fue adquirida en Novozymes A/S (Bagsværd, Dinamarca), y el ácido tricloroacético (TCA), ácido fosfórico y etanol 95% en Sharlab, S.L. (Sentmenat, Barcelona, España).

### **2.2 Preparación de los hidrolizados proteicos**

Los hidrolizados de proteína lactosérica y de gelatina se prepararon siguiendo el protocolo descrito por Jancikova et al. (2019), con ligeras modificaciones. Para ello, en cada caso se disolvió 1 g de proteína en 40 mL de tampón Tris (50 mM), se ajustó el pH a 7 con NaOH (1 M), y se añadieron 50 mg de la enzima Protamex<sup>®</sup>. La hidrólisis se realizó en un agitador orbital a 50 °C durante 180 min. Transcurrido este tiempo, los tubos se pusieron en un baño de agua a 90 °C durante 10 min para parar la reacción enzimática. Las muestras se centrifugaron durante 15 min a 8000 rpm y el sobrenadante fue recogido y congelado para su posterior liofilización.

### **2.3 Preparación y optimización de las cremas**

Para la preparación de la crema de champiñones se utilizó leche entera (40%, p/p), champiñones (40%, p/p), agua (20%, p/p) y sal. Estos ingredientes fueron cocinados a 90 °C durante 10 min en un robot de cocina (Mycook One, Taurus, España) y posteriormente triturados hasta obtener una mezcla homogénea. Las cremas enriquecidas fueron preparadas mediante la incorporación de cada una de las fuentes de proteína a la crema de champiñones, previamente atemperada en un baño de agua a 40 °C. La cantidad de proteína añadida fue calculada para alcanzar un valor proteico 4 veces mayor al valor inicial de la crema de

champiñones. La Tabla 1 presenta la concentración (% p/p) de proteína añadida en la preparación de las muestras. La determinación del contenido proteico se llevó a cabo mediante el método de Kjeldahl siguiendo el protocolo descrito en AOAC (1990). La textura de las muestras fue modificada mediante la incorporación de los hidrocoloides (AM o CMC) a la crema, previamente atemperada a 70 °C. Las muestras se homogeneizaron mediante el uso de una varilla magnética hasta lograr una dispersión uniforme, y se almacenaron 24 h a 4 °C hasta su caracterización. Para asegurar que la viscosidad aparente ( $\eta_{app}$ ) de las cremas determinada a 50 s<sup>-1</sup> y 37 °C fueran cercanos a 2000 mPa·s, las muestras fueron optimizadas mediante el uso de un reómetro Kinexus Pro+ (Malvern Instruments Ltd., MA, EE. UU.) equipado con una geometría placa-placa y con control de temperatura. La concentración (% p/p) de cada hidrocoloide empleado para preparar las cremas se muestra en la Tabla 1. Se prepararon dos lotes independientes para todas las muestras.

**TABLA 1.** Concentración de cada proteína e hidrocoloide empleados para la elaboración de las cremas de champiñones.

Muestra	Proteína	Concentración (% p/p)	Hidrocoloide	Concentración (% p/p)
<b>WPC - AM</b>	Concentrado de proteína lactosérica	15%	Almidón modificado	6,85%
<b>WPC - CMC</b>			Carboximetilcelulosa	1,15%
<b>HD WPC - AM</b>	Hidrolizado de proteína lactosérica	17%	Almidón modificado	10,75%
<b>HD WPC - CMC</b>			Carboximetilcelulosa	1,30%
<b>GB - AM</b>	Gelatina bovina	10%	Almidón modificado	7,20%
<b>GB - CMC</b>			Carboximetilcelulosa	0,90%
<b>HD GB - AM</b>	Hidrolizado de gelatina bovina	13%	Almidón modificado	8,50%
<b>HD GB - CMC</b>			Carboximetilcelulosa	1,30%

WPC: Proteína lactosérica; HD WPC: Hidrolizado de proteína lactosérica; GB: Gelatina bovina; HD GB: Hidrolizado de gelatina bovina; AM: Almidón modificado; CMC: Carboximetilcelulosa de sodio.

## 2.4 Caracterización reológica y viscoelástica de las muestras

La caracterización reológica y viscoelástica de las muestras se llevó a cabo mediante el uso de un reómetro con geometría placa-placa, tal y como se indica en el punto 2.3, siguiendo el método descrito por Talens et al. (2021) con ligeras modificaciones. La muestra se colocó en la superficie de la placa inferior y la placa superior se bajó hasta alcanzar un espacio entre placas de 1 mm. Se aplicó una fina capa de aceite de silicona para evitar pérdidas de solvente por evaporación (Álvarez et al., 2017). Las muestras se mantuvieron durante 5 min en reposo a fin de relajar su estructura y equilibrar la temperatura de trabajo (37 °C). Cada medición se realizó por duplicado.

#### 2.4.1 DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FLUJO

El comportamiento del flujo en régimen estacionario de las cremas de champiñones enriquecidas con proteínas y con textura modificada se evaluó mediante el análisis de sus curvas de flujo. Para ello, las muestras fueron sometidas a un gradiente de velocidad de 0,1 a 100 s<sup>-1</sup> durante 3 min. Los datos obtenidos se ajustaron al modelo de Hershel-Bulkley, y se calculó el umbral de fluencia ( $\sigma_0$ ), el coeficiente de consistencia (K) y el índice de comportamiento de flujo (n) mediante la ecuación (1):

$$\sigma = \sigma_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

donde  $\sigma$  es el esfuerzo cortante (Pa),  $\sigma_0$  el umbral de fluencia,  $\dot{\gamma}$  el gradiente de velocidad (s<sup>-1</sup>), K es el índice de consistencia (Pa·s<sup>n</sup>), y n es el índice de comportamiento al flujo (adimensional). La bondad del ajuste se evaluó utilizando el coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>).

#### 2.4.2 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS

Las propiedades viscoelásticas de las muestras se evaluaron mediante ensayos viscoelásticos lineales y no lineales. Para determinar los límites de la región viscoelástica lineal (LVR), se realizó un ensayo oscilatorio de gran amplitud (LAOS). La prueba de barrido de esfuerzo se realizó dentro de un rango de esfuerzo de 0,1 a 100 Pa a 1 Hz. Las propiedades viscoelásticas en la LVR fueron caracterizadas mediante un ensayo oscilatorio de pequeña amplitud (SAOS), usando un rango de frecuencias desde 0,1 a 10 Hz con un valor de esfuerzo de 1 Pa (fijado dentro de la LVR). Los cambios en la viscosidad compleja ( $\eta^*$ ), módulo complejo ( $G^*$ ), módulo elástico ( $G'$ ), módulo viscoso ( $G''$ ) y tangente del ángulo de fase ( $\tan \delta = G''/G'$ ) se registraron mediante el uso del software de análisis de datos proporcionado por el equipo. Cada ensayo se realizó por duplicado.

### 2.5 Digestión gastrointestinal *in vitro*

La simulación de la digestión gastrointestinal (DGI) se realizó siguiendo el protocolo estandarizado INFOGEST (Minekus et al., 2014; Brodkorb et al., 2019). Durante todo el ensayo, las muestras se mantuvieron a 37 °C dentro de una cámara de incubación (JP Selecta, S.A., Barcelona España) y en agitación a 40 rpm mediante un agitador Intelli-Mixer<sup>TM</sup> RM-2M (ELMI Ltd., Riga, Letonia). Cada muestra fue digerida por duplicado. Para simular la fase oral, las muestras se mezclaron con el fluido salival simulado (FSS) (pH 7) y la  $\alpha$ -amilasa salival (75 U/mL) en proporción 1:1 (p/v), y se agitaron durante 2 min a 37 °C. Para la etapa gástrica, el fluido gástrico simulado (FGS) y la pepsina gástrica (2000 U/mL) se añadieron al bolo oral obtenido anteriormente en proporción 1:1 (v/v). El pH se ajustó a 3 con HCl (1 M), y la mezcla fue incubada en agitación durante 2 horas a 37 °C. Finalmente, y para simular la fase intestinal, el fluido intestinal simulado (FIS), la bilis (10 mM) y la pancreatina (basado en una actividad de tripsina de 100 U/mL) se mezclaron con el quimo gástrico en proporción 1:1 (v/v). El pH de la mezcla se ajustó a 7 con NaOH (1 M) y se incubó 2 h a 37 °C. Trascorrido este

tiempo, las muestras se colocaron en un baño de agua a 95 °C durante 5 min seguido de un baño con hielo durante 10 min, con el fin de inactivar las enzimas. Una parte de la muestra resultante se utilizó directamente para el análisis reológico, mientras que la otra parte se centrifugó a 10000 rpm durante 10 min, y el sobrenadante recogido se almacenó a -20 °C para los ensayos de digestibilidad. Se realizaron controles de las tres fases digestivas, los cuales contenían solo las enzimas específicas de cada etapa y fluidos digestivos (sin muestra) y que se sometieron al mismo proceso de digestión. Estas muestras control fueron posteriormente analizadas y los valores obtenidos fueron sustraídos a partir de los valores de las muestras digeridas.

## **2.6 Caracterización reológica de las muestras digeridas**

La caracterización reológica de las muestras digeridas se realizó mediante el uso de un reómetro KinexusPro+ (Malvern Instruments Ltd., MA, EE. UU.) equipado con una geometría de cilindros concéntricos (C25/PC25) y con control de temperatura, siguiendo el método descrito en el punto 2.4.1. La muestra se colocó en el cilindro inferior y el cilindro superior se bajó hasta alcanzar un espacio entre cilindros de 1 mm. El tiempo de relajación fue de 2 min. Se obtuvieron las curvas de flujo de las diferentes muestras a 37 °C en un gradiente de velocidad de 0,1 y 100 s<sup>-1</sup> durante 3 min. Los datos obtenidos se ajustaron al modelo reológico de Ostwald-de Waele (ley de potencia) y con los parámetros obtenidos se calculó la  $\eta_{app}$  a 10 s<sup>-1</sup>, el índice de consistencia (K) y el índice de comportamiento de flujo (n) para cada muestra. Este gradiente de velocidad fue seleccionado con el objetivo de simular el gradiente de velocidad que tiene lugar durante la digestión (Lentle et al., 2007). La bondad del ajuste al modelo se evaluó mediante el coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>). Para evaluar si los cambios en las propiedades reológicas de las muestras digeridas eran debidos a las acciones enzimáticas o al efecto dilución, se realizaron blancos en los que el volumen resultante de la adición de enzimas y fluidos digestivos durante el proceso de DGI fue sustituido por agua.

## **2.7 Ensayos de digestibilidad**

### **2.7.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO TOTAL DE PROTEÍNAS SOLUBLES**

El contenido total de proteínas solubles se determinó siguiendo el método descrito por Bradford (1976). Para la preparación del reactivo de Bradford se pesaron 40 mg de azul de Coomassie y se mezclaron con 20 mL de etanol 95% y 40 mL de ácido fosfórico 85%. Posteriormente, se aforó a 400 mL con agua destilada y se filtró con papel de filtro Whatman nº1. Para el análisis, 2 mL del reactivo de Bradford se mezclaron con 40 µL de muestra. La mezcla se incubó durante 5 min a temperatura ambiente y, seguidamente, se midió la absorbancia de las muestras a 595 nm en un espectrofotómetro UV-Visible (Helios Zeta, Thermo Scientific, Reino Unido). Para determinar la cantidad de proteínas solubles se realizó una curva patrón de BSA (0-1 mg/mL) y los resultados se expresaron como mg BSA/g muestra.

## 2.7.2 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PÉPTIDOS SOLUBLES

La concentración de péptidos solubles en TCA se determinó empleando el método descrito por Ketnawa y Ogawa (2019). Para ello, 150  $\mu\text{L}$  de muestra se mezclaron con 1350  $\mu\text{L}$  de TCA 5%, se agitó y se mantuvo 60 min a 4 °C. Transcurrido el tiempo, se centrifugó a 8000 rpm durante 10 min, se recogió el sobrenadante y se midió la absorbancia a 280 nm en un espectrofotómetro UV-Visible. Se realizó una curva patrón de L-tirosina (0-1 mg/mL) y los resultados se expresaron en mg de tirosina/g muestra.

## 2.7.3 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE GRUPOS AMINO LIBRES

La concentración de grupos amino libres se determinó empleando el método TNBS descrito por Adler-Nissen (1979). Para ello, 25  $\mu\text{L}$  de muestra preparada en SDS al 1% se mezclaron con 200  $\mu\text{L}$  de tampón fosfato de sodio (0,2 M, pH 8,2) y 200  $\mu\text{L}$  de TNBS (0,1%). La mezcla se agitó y se calentó a 50 °C durante 60 min. Posteriormente, se añadieron 400  $\mu\text{L}$  de HCl (0,1 N). Tras 30 min en reposo, se midió la absorbancia a 340 nm en un espectrofotómetro UV-Visible. Se realizó una curva patrón de L-leucina (0-5 mM) preparada en SDS 1% y los resultados se expresaron en mg de L-leucina/g muestra.

## 2.8 Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante el software Statgraphics Centurion XVII (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, VA, EE. UU) utilizando el análisis de la varianza (ANOVA) y método de Tukey-Kramer HSD. Los resultados se expresaron como la media de las repeticiones  $\pm$  desviación estándar, y las diferencias se consideraron estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Determinación del comportamiento de flujo

El comportamiento de flujo en régimen estacionario de las muestras se describió mediante el modelo de Hershel-Bulkley, modelo reológico que describe el comportamiento de materiales plásticos. La Tabla 2 presenta los resultados de la prueba de comportamiento de flujo en régimen estacionario de las cremas de champiñones enriquecidas con proteína y con textura modificada a 37 °C. En cuanto a la  $\eta_{app}$  de las muestras, los resultados se presentan tanto a 10  $\text{s}^{-1}$  como a 50  $\text{s}^{-1}$  puesto que un aumento de la  $\eta_{app}$  de las muestras a bajos gradientes de velocidad facilita la formación del bolo y previene el flujo incontrolado que podría verse comprometido durante el envejecimiento (Books et al.,2021; Herranz et al.,2021). Los valores de  $\eta_{app}$  de las muestras a 10  $\text{s}^{-1}$  oscilaron entre  $5707 \pm 263$   $\text{mPa}\cdot\text{s}$  y  $6792 \pm 38$   $\text{mPa}\cdot\text{s}$ , mientras que los valores de  $\eta_{app}$  de las cremas determinados a 50  $\text{s}^{-1}$  oscilaron entre  $1888 \pm 220$   $\text{mPa}\cdot\text{s}$  y  $2151 \pm 107$   $\text{mPa}\cdot\text{s}$ . Así

pues, las muestras presentaron una importante disminución de los valores de  $\eta_{app}$  a medida que aumentaba el gradiente de velocidad debido a la ruptura de las moléculas generada por las fuerzas hidrodinámicas y al aumento de la alineación de las moléculas de los hidrocoloides (Izidoro et al., 2008). Este efecto fue observado también por Herranz et al. (2021) en purés comerciales destinados a personas con problemas de deglución.

**TABLA 2.** Parámetros reológicos de las diferentes cremas de champiñones enriquecidas con textura modificada.

Muestra	$\eta_{app}^a$ 10 s <sup>-1</sup> (mPa·s)	$\eta_{app}^a$ 50 s <sup>-1</sup> (mPa·s)	$\sigma_0$ (Pa)	n	K (Pa·s <sup>n</sup> )	R <sup>2</sup>
<b>WPC - AM</b>	6792 ± 38 <sup>a</sup>	2016 ± 3 <sup>ab</sup>	47,21 ± 0,59 <sup>a</sup>	0,597 ± 0,004 <sup>a</sup>	5,35 ± 0,07 <sup>a</sup>	0,987
<b>WPC - CMC</b>	5622 ± 551 <sup>a</sup>	1889 ± 153 <sup>a</sup>	36,29 ± 2,52 <sup>a</sup>	0,605 ± 0,037 <sup>a</sup>	4,99 ± 1,16 <sup>a</sup>	0,969
<b>HD WPC - AM</b>	5845 ± 100 <sup>a</sup>	1939 ± 30 <sup>ab</sup>	35,32 ± 0,81 <sup>a</sup>	0,609 ± 0,003 <sup>a</sup>	5,69 ± 0,07 <sup>a</sup>	0,992
<b>HD WPC - CMC</b>	6161 ± 121 <sup>a</sup>	1989 ± 22 <sup>ab</sup>	30,09 ± 0,09 <sup>a</sup>	0,599 ± 0,004 <sup>a</sup>	5,88 ± 0,15 <sup>a</sup>	0,977
<b>GB - AM</b>	5749 ± 624 <sup>a</sup>	1888 ± 220 <sup>ab</sup>	36,99 ± 3,40 <sup>a</sup>	0,593 ± 0,005 <sup>a</sup>	5,23 ± 0,71 <sup>a</sup>	0,996
<b>GB - CMC</b>	5707 ± 263 <sup>a</sup>	2151 ± 107 <sup>b</sup>	29,94 ± 1,24 <sup>a</sup>	0,653 ± 0,022 <sup>a</sup>	6,04 ± 0,54 <sup>a</sup>	0,973
<b>HD GB - AM</b>	6328 ± 834 <sup>a</sup>	2014 ± 224 <sup>ab</sup>	39,83 ± 5,79 <sup>a</sup>	0,607 ± 0,008 <sup>a</sup>	6,01 ± 0,84 <sup>a</sup>	0,985
<b>HD GB - CMC</b>	6231 ± 50 <sup>a</sup>	2027 ± 46 <sup>ab</sup>	37,28 ± 0,25 <sup>a</sup>	0,601 ± 0,008 <sup>a</sup>	6,27 ± 0,19 <sup>a</sup>	0,978

Viscosidad aparente ( $\eta_{app}$ ) a 10 s<sup>-1</sup> y 50 s<sup>-1</sup>; umbral de fluencia ( $\sigma_0$ ); índice de comportamiento de flujo (n); índice de consistencia (K); coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>). Diferentes superíndices indican diferencias significativas entre las diferentes muestras ( $p < 0,05$ ).

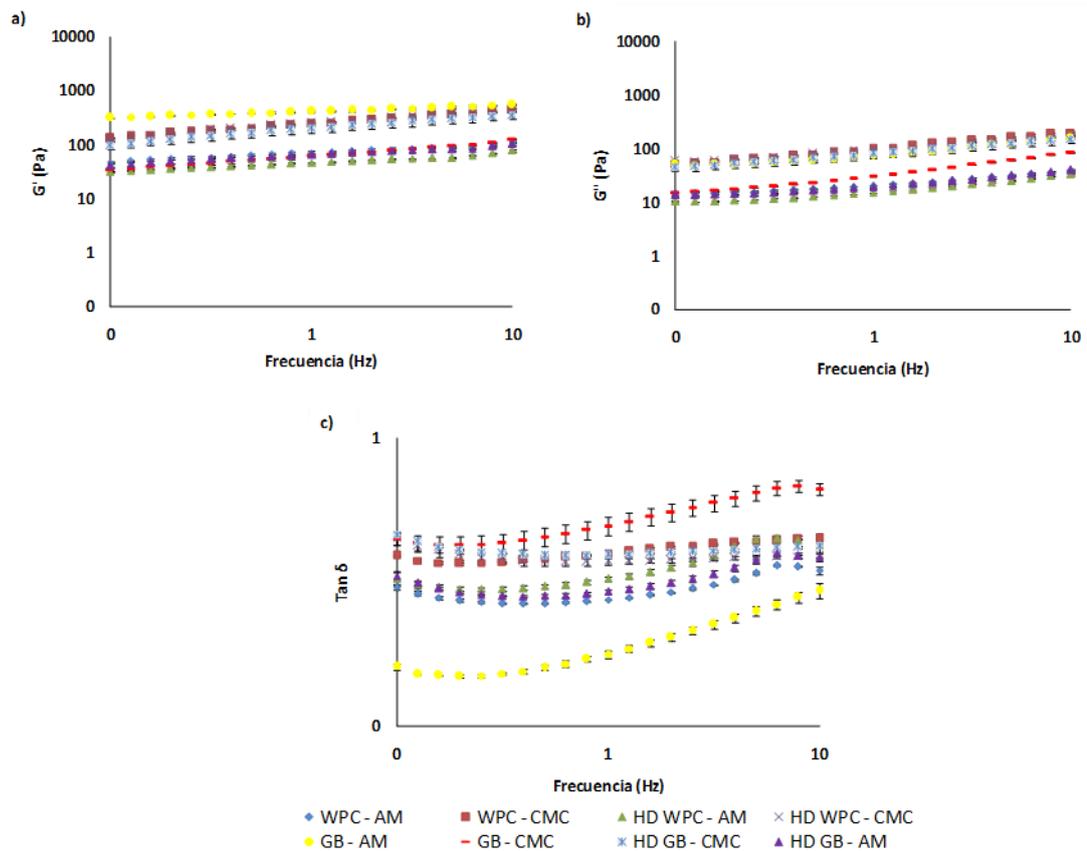
WPC: Proteína lactosérica; HD WPC: Hidrolizado de proteína lactosérica; GB: Gelatina bovina; HD GB: Hidrolizado de gelatina bovina; AM: Almidón modificado; CMC: Carboximetilcelulosa de sodio.

El umbral de fluencia ( $\sigma_0$ ) representa el mínimo esfuerzo requerido para que un material empiece a fluir, y está relacionado con la ruptura de la estructura interna de la muestra (Augusto et al., 2012). No se observaron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre las distintas cremas con respecto a los valores de  $\sigma_0$ . Sin embargo, la crema WPC - AM presentó el  $\sigma_0$  más elevado, sugiriendo un mayor empaquetamiento de las partículas. La estructura del sistema podría describirse como un gel en el que la fase continua es una red compuesta por una mezcla de amilosa y proteína (Vu Dang et al., 2009). Asimismo, cabe remarcar que en general se observaron mayores valores de  $\sigma_0$  en las muestras formuladas con AM como espesante, independientemente de la proteína utilizada para enriquecer las cremas. Este resultado podría atribuirse a la capacidad de los gránulos de almidón de reforzar la red de proteínas al dispersarse en ella y actuar como relleno en esta red (Vu Dang et al., 2009; Agyemang et al., 2020).

En cuanto al índice de consistencia (K), no se observaron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre las distintas cremas. Los valores de K de las muestras oscilaron entre 4,99 ± 1,16 y 6,27 ± 0,19, siendo similares a los observados por Herranz et al. (2021) en muestras comerciales de purés. Asimismo, los valores de n de todas las muestras evaluadas fueron inferiores a 1, confirmando el comportamiento de flujo no newtoniano tras superar el  $\sigma_0$  (Vieira et al., 2021). Productos con valores de  $n < 1$  se asocian con una deglución sin riesgo de aspiración, puesto que el sistema neuromuscular tiene mayor tiempo de respuesta para cerrar la epiglotis (Nakauma et al., 2011) y siendo, por tanto, adecuados para las personas mayores.

### 3.2 Determinación de las propiedades viscoelásticas

La evaluación de las propiedades viscoelásticas de los alimentos con textura modificada es importante ya que los espesantes influyen en la capacidad de deglución del bolo alimenticio (Park y Yoo, 2020). La Figura 1 presenta la dependencia del módulo elástico ( $G'$ ), del módulo viscoso ( $G''$ ) y de la tangente del ángulo de fase ( $\text{Tan } \delta$ ) en función de la frecuencia a 37 °C. La contribución del módulo elástico fue mayor que la del módulo viscoso ( $G' > G''$ ) en todas las muestras, lo que se asocia a la formación de una red débil por la agregación de partículas (Álvarez et al., 2017). Este comportamiento fue descrito también por Ribes et al. (2021) en salsas con textura modificada destinadas a personas con problemas de deglución. Además, la tangente del ángulo de fase ( $\text{Tan } \delta = G''/G'$ ) proporciona información sobre el equilibrio de  $G'$  y  $G''$  de un material (Sharma et al., 2017). Así pues, valores de  $\text{Tan } \delta$  por debajo de 0,1 indican geles fuertes, mientras que valores entre 0,1 y 1 indican geles débiles (Irani et al., 2019). En la Figura 1 se observa que todas las muestras exhibieron valores de  $\text{Tan } \delta$  entre 0,14 y 0,70 en todo el rango de frecuencias estudiado, confirmando el comportamiento de gel débil (Sharma et al., 2017).



**FIGURA 1.** Dependencia del módulo elástico (a), viscoso (b), y tangente del ángulo de fase (c) frente a la frecuencia, de las cremas de champiñones enriquecidas con textura modificada.

Desde un punto de vista estructural, las pendientes ( $n'$  y  $n''$ ) de las curvas  $\text{Ln } G'_0$  y  $\text{Ln } G''_0$  vs frecuencia, también pueden utilizarse como criterio para evaluar las propiedades del gel, ya que están relacionadas con la extensión y estabilidad del gel. Así pues, la pendiente ( $n'$  o  $n''$ ) en geles verdaderos es igual a 0, mientras que en geles débiles y soluciones concentradas la pendiente tiene valores positivos (Álvarez et al., 2017; Irani et al., 2019). La Tabla 3 presenta los parámetros de las propiedades del gel de las diferentes muestras obtenidas a 37 °C.

**TABLA 3.** Parámetros de las propiedades del gel de las cremas de champiñones enriquecidas con textura modificada

Muestra	$n'$	$R^2$	$n''$	$R^2$	$G'_0 - G''_0$ (Pa)
WPC - AM	0,162 ± 0,002 <sup>b</sup>	0,992	0,216 ± 0,002 <sup>a</sup>	0,967	53 ± 3 <sup>c</sup>
WPC - CMC	0,256 ± 0,002 <sup>c</sup>	0,999	0,302 ± 0,002 <sup>c</sup>	0,998	147 ± 9 <sup>b</sup>
HD WPC - AM	0,170 ± 0,001 <sup>b</sup>	0,977	0,246 ± 0,004 <sup>b</sup>	0,968	32 ± 1 <sup>c</sup>
HD WPC - CMC	0,255 ± 0,016 <sup>c</sup>	0,996	0,241 ± 0,006 <sup>ab</sup>	0,997	159 ± 3 <sup>b</sup>
GB - AM	0,119 ± 0,009 <sup>a</sup>	0,997	0,271 ± 0,017 <sup>bc</sup>	0,967	342 ± 8 <sup>a</sup>
GB - CMC	0,269 ± 0,013 <sup>c</sup>	0,996	0,384 ± 0,011 <sup>d</sup>	0,991	31 ± 4 <sup>c</sup>
HD GB - AM	0,176 ± 0,001 <sup>b</sup>	0,991	0,236 ± 0,012 <sup>ab</sup>	0,963	47 ± 4 <sup>c</sup>
HD GB - CMC	0,276 ± 0,004 <sup>c</sup>	0,994	0,270 ± 0,001 <sup>bc</sup>	0,999	123 ± 23 <sup>b</sup>

Pendiente de la curva  $\text{Ln } G'_0$  vs frecuencia ( $n'$ ); pendiente de la curva  $\text{Ln } G''_0$  vs frecuencia ( $n''$ ); coeficiente de correlación ( $R^2$ ); fuerza del gel ( $G'_0 - G''_0$ ). Diferentes superíndices indican diferencias significativas entre las diferentes muestras ( $p < 0,05$ ).

WPC: Proteína lactosérica; HD WPC: Hidrolizado de proteína lactosérica; GB: Gelatina bovina; HD GB: Hidrolizado de gelatina bovina; AM: Almidón modificado; CMC: Carboximetilcelulosa de sodio.

Todas las muestras presentaron valores de  $n'$  y  $n''$  entre 0 y 1, lo que podría atribuirse al comportamiento de geles débiles. En general, las muestras presentaron mayores valores de  $n''$  que  $n'$ , lo que indica que  $G''$  fue más dependiente de la frecuencia. Este comportamiento fue descrito también por Álvarez y Canet (2013) en purés de verduras con lubina, verduras con ternera, y verduras con pollo. En cuanto a los valores de fuerza del gel ( $G'_0 - G''_0$ ), cabe remarcar que la formulación GB - AM presenta el valor más elevado pudiendo atribuirse este efecto a la red tridimensional formada entre las proteínas y el AM durante el tratamiento térmico (Lin et al., 2020).

Para una mejor interpretación de los resultados y así poder compararlos fácilmente, la Tabla 4 muestra las propiedades viscoelásticas de las distintas cremas obtenidas a 1 Hz en el ensayo SAOS. Todas las muestras presentaron valores de módulo elástico mayores a los del módulo viscoso lo que confirma el comportamiento de geles débiles. Además, el módulo complejo ( $G^*$ ) indica la resistencia total de una sustancia frente a la deformación aplicada, y proporciona una idea de la rigidez del material, mientras que la viscosidad compleja ( $\eta^*$ ) representa de la resistencia total al flujo según la frecuencia angular (Talens et al., 2021). La muestra GB - AM presentó los valores más altos tanto de  $G^*$  como de  $\eta^*$ , reflejando las interacciones moleculares producidas en la matriz con una mejora de la estructura (Lin et al., 2020). Los valores de las otras muestras son

más bajos, reflejando una estructura menos rígida. Finalmente, en cuanto a los valores de  $\text{Tan } \delta$ , todas las muestras presentaron valores entre 0 y 1, rango considerado como seguro en alimentos para personas con problemas de deglución (Ishihara et al., 2011), siendo especialmente importante con el envejecimiento.

**TABLA 4.** Parámetros viscoelásticos de las cremas de champiñones enriquecidas con textura modificada a 1 Hz.

Muestra	G' (Pa)	G'' (Pa)	G*	$\eta^*$ (Pa·s)	Tan $\delta$
WPC - AM	72 ± 4 <sup>a</sup>	20 ± 1 <sup>a</sup>	75 ± 4 <sup>a</sup>	12 ± 1 <sup>a</sup>	0,2749 ± 0,005 <sup>b</sup>
WPC - CMC	244 ± 14 <sup>b</sup>	98 ± 5 <sup>c</sup>	263 ± 15 <sup>b</sup>	42 ± 2 <sup>b</sup>	0,399 ± 0,003 <sup>d</sup>
HD WPC - AM	47 ± 1 <sup>a</sup>	15,2 ± 0,1 <sup>a</sup>	49 ± 1 <sup>a</sup>	7,8 ± 0,2 <sup>a</sup>	0,325 ± 0,005 <sup>bc</sup>
HD WPC - CMC	253 ± 1 <sup>b</sup>	95 ± 2 <sup>bc</sup>	270,2 ± 0,2 <sup>b</sup>	43,05 ± 0,04 <sup>b</sup>	0,373 ± 0,009 <sup>cd</sup>
GB - AM	415 ± 12 <sup>c</sup>	74 ± 4 <sup>b</sup>	422 ± 13 <sup>c</sup>	67 ± 2 <sup>c</sup>	0,178 ± 0,006 <sup>b</sup>
GB - CMC	62 ± 4 <sup>c</sup>	30,8 ± 0,1 <sup>a</sup>	69 ± 4 <sup>a</sup>	11 ± 1 <sup>a</sup>	0,49 ± 0,04 <sup>ae</sup>
HD GB - AM	66 ± 5 <sup>a</sup>	19 ± 1 <sup>a</sup>	69 ± 5 <sup>a</sup>	11 ± 1 <sup>a</sup>	0,293 ± 0,005 <sup>a</sup>
HD GB - CMC	203 ± 39 <sup>b</sup>	80 ± 15 <sup>bc</sup>	219 ± 42 <sup>b</sup>	35 ± 7 <sup>b</sup>	0,3937 ± 0,0001 <sup>d</sup>

Módulo elástico (G'); módulo viscoso (G''); módulo complejo (G\*); viscosidad compleja ( $\eta^*$ ); tangente del ángulo de fase (Tan  $\delta$ ). Diferentes superíndices indican diferencias significativas entre las diferentes muestras ( $p < 0,05$ ).

WPC: Proteína lactosérica; HD WPC: Hidrolizado de proteína lactosérica; GB: Gelatina bovina; HD GB: Hidrolizado de gelatina bovina; AM: Almidón modificado; CMC: Carboximetilcelulosa de sodio.

### 3.3 Caracterización reológica de las muestras digeridas

Durante la digestión, los alimentos se someten a fuerzas tanto mecánicas como químicas para su descomposición, de modo que sus nutrientes se puedan absorber fácilmente en el tracto intestinal (Lu et al., 2019). Para estudiar y analizar la influencia de estas fuerzas en general, y de los fluidos gastrointestinales en particular, sobre la estructura de la matriz alimentaria, se determinaron diferentes parámetros reológicos durante la DGI simulada. La incorporación de fluidos digestivos provoca un aumento de volumen y, por lo tanto, un efecto dilución que junto con las condiciones del tracto digestivo (acción enzimática, cambios en el pH y fuerza iónica) pueden afectar a las proteínas y, especialmente, a las propiedades de los hidrocoloides añadidos, produciendo cambios en la reología de las muestras (Chen et al., 2020).

En la Tabla 5 se muestran los parámetros reológicos obtenidos con el modelo de la ley de potencia durante las tres fases de la DGI simulada (etapas oral, gástrica e intestinal), tanto de las muestras digeridas como considerando el efecto dilución (sin enzimas). La viscosidad de todas las muestras en la fase oral calculada a un gradiente de  $10 \text{ s}^{-1}$  fue considerablemente más alta en comparación a la viscosidad en las etapas gástrica e intestinal, disminuyendo a lo largo de la DGI. En la fase oral, la mayor  $\eta_{\text{app}}$  se observó para la muestra GB - AM, con un valor de 417 mPa·s, mientras que en la fase gástrica fue mayor en HD GB-CMC (65 mPa·s). En la fase intestinal, no se observaron diferencias significativas entre las distintas muestras ( $p > 0,05$ ). Resultados similares se mostraron en el trabajo de Malinauskytė et al. (2018), donde la pérdida de estructura y la

desestabilización de la matriz durante la DGI resultaría de la dilución de la muestra y del ambiente gastrointestinal (pH, fuerza iónica y acción enzimática). Comparando los datos de las muestras digeridas con los obtenidos en las muestras diluidas, los valores de  $\eta_{app}$  de las muestras digeridas fueron mucho menores en todos los casos. Estas diferencias fueron más evidentes en la etapa oral, principalmente en la muestra WPC - AM (34 veces menor), y en la muestra HD GB - AM (14 veces menor). En la etapa gástrica, la  $\eta_{app}$  de todas las muestras disminuyó respecto a las muestras diluidas, de forma más pronunciada en las muestras WPC - AM (23 veces menor) y GB - AM (8 veces menor). La disminución de la viscosidad con el avance de la DGI coincidió con la disminución del índice de consistencia (K), lo que indica una desestructuración de la matriz por las condiciones gastrointestinales (Malinauskytė et al. (2014)). Estos resultados indican que, tanto el efecto dilución por adición de los fluidos gastrointestinales, como la acción enzimática provocaría una disminución de la  $\eta_{app}$  y del K durante la DGI, siendo evidente la actividad de la  $\alpha$ -amilasa durante la fase oral en la hidrólisis de AM y de la pepsina hidrolizando las proteínas en la etapa gástrica (Iqbal et al., 2021; Morell et al., 2017). Al final de la fase intestinal, todas las muestras presentaron viscosidades bajas, entre 3-8 mPa·s para las muestras digeridas y entre 4-24 mPa·s para las muestras diluidas. WPC - AM presentó la mayor diferencia (8 veces) entre la muestra digerida y la muestra diluida, seguida de la muestra GB - AM (5 veces), lo que sugiere que fueron las muestras más afectadas por las condiciones gastrointestinales (acción enzimática, pH y sales biliares). En general, no se observaron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre las muestras digeridas para ningún parámetro reológico en la etapa intestinal, sin embargo, sí que se observaron diferencias en las muestras diluidas, lo que indicaría que el efecto dilución es lo que principalmente provoca la reducción de  $\eta_{app}$  y del K al final de la DGI simulada. Respecto al índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), se observó un comportamiento pseudoplástico en todas las muestras durante todas las etapas, ya que los valores de las muestras oscilaron entre 0,3 al inicio de la digestión y 0,9 al final de la digestión.

En general, la presencia de proteínas y almidón en la matriz alimentaria puede influir en la velocidad de digestión debido a las interacciones que tienen lugar entre las moléculas por la formación de enlaces de hidrógeno, fuerzas electrostáticas y fuerzas de Van der Waals (Yang et al., 2019). Estos resultados demostraron que la digestión proteica se ve afectada por el tipo de interacciones que se producen dentro de la matriz. El comportamiento de cada muestra fue diferente en función de la fuente de proteína, intacta o hidrolizada, así como de la carga del hidrocoloide, neutro o aniónico, lo que refleja la complejidad de la red formada en cada matriz. Entre las muestras analizadas, WPC - AM y GB - AM serían las más afectadas a nivel de propiedades reológicas durante la DGI.

**TABLA 5.** Parámetros reológicos de las diferentes cremas de champiñones enriquecidas y con textura modificada durante la digestión gastrointestinal simulada.

<b>MUESTRAS DIGERIDAS</b>									
Digestión	Parámetro	Muestra							
		WPC - AM	WPC - CMC	HD WPC - AM	HD WPC - CMC	GB - AM	GB - CMC	HD GB - AM	HD GB - CMC
Fase oral	$\eta_{app}$ (mPa·s)	34 ± 3 <sup>d</sup>	94 ± 4 <sup>c</sup>	26 ± 4 <sup>d</sup>	171 ± 13 <sup>b</sup>	417 ± 5 <sup>a</sup>	80 ± 9 <sup>c</sup>	42 ± 4 <sup>d</sup>	197 ± 14 <sup>b</sup>
	n	0,41 ± 0,03 <sup>bcd</sup>	0,48 ± 0,03 <sup>abc</sup>	0,39 ± 0,04 <sup>cd</sup>	0,62 ± 0,05 <sup>a</sup>	0,30 ± 0,02 <sup>d</sup>	0,54 ± 0,03 <sup>ab</sup>	0,37 ± 0,03 <sup>a</sup>	0,58 ± 0,04 <sup>a</sup>
	K(Pa·s <sup>n</sup> )	0,13 ± 0,02 <sup>d</sup>	0,31 ± 0,04 <sup>bcd</sup>	0,11 ± 0,02 <sup>d</sup>	0,42 ± 0,08 <sup>bc</sup>	2,07 ± 0,12 <sup>a</sup>	0,23 ± 0,04 <sup>cd</sup>	0,18 ± 0,03 <sup>b</sup>	0,53 ± 0,09 <sup>b</sup>
	R <sup>2</sup>	0,995	0,996	0,991	0,996	0,994	0,989	0,994	0,994
Fase gástrica	$\eta_{app}$ (mPa·s)	7 ± 3 <sup>cd</sup>	33 ± 6 <sup>bc</sup>	5 ± 3 <sup>d</sup>	52 ± 13 <sup>ab</sup>	15 ± 3 <sup>cd</sup>	23 ± 5 <sup>cd</sup>	9 ± 5 <sup>cd</sup>	65 ± 7 <sup>a</sup>
	n	0,6 ± 0,2 <sup>a</sup>	0,56 ± 0,08 <sup>a</sup>	0,7 ± 0,3 <sup>a</sup>	0,53 ± 0,06 <sup>a</sup>	0,47 ± 0,08 <sup>a</sup>	0,633 ± 0,113 <sup>a</sup>	0,6 ± 0,2 <sup>a</sup>	0,55 ± 0,05 <sup>a</sup>
	K(Pa·s <sup>n</sup> )	0,020 ± 0,018 <sup>c</sup>	0,09 ± 0,04 <sup>abc</sup>	0,015 ± 0,014 <sup>c</sup>	0,16 ± 0,06 <sup>ab</sup>	0,05 ± 0,02 <sup>bc</sup>	0,06 ± 0,03 <sup>bc</sup>	0,03 ± 0,02 <sup>c</sup>	0,19 ± 0,04 <sup>a</sup>
	R <sup>2</sup>	0,953	0,982	0,963	0,985	0,996	0,987	0,974	0,994
Fase intestinal	$\eta_{app}$ (mPa·s)	3 ± 2 <sup>a</sup>	7 ± 4 <sup>a</sup>	3 ± 2 <sup>a</sup>	8 ± 4 <sup>a</sup>	3 ± 2 <sup>a</sup>	6 ± 4 <sup>a</sup>	3 ± 2 <sup>a</sup>	8 ± 5 <sup>a</sup>
	n	0,8 ± 0,3 <sup>a</sup>	0,8 ± 0,3 <sup>a</sup>	0,8 ± 0,4 <sup>a</sup>	0,9 ± 0,3 <sup>a</sup>	0,8 ± 0,3 <sup>a</sup>	0,8 ± 0,3 <sup>a</sup>	0,8 ± 0,3 <sup>a</sup>	0,9 ± 0,4 <sup>a</sup>
	K(Pa·s <sup>n</sup> )	0,008 ± 0,012 <sup>a</sup>	0,016 ± 0,015 <sup>a</sup>	0,007 ± 0,008 <sup>a</sup>	0,015 ± 0,015 <sup>a</sup>	0,006 ± 0,007 <sup>a</sup>	0,013 ± 0,014 <sup>a</sup>	0,007 ± 0,009 <sup>a</sup>	0,02 ± 0,02 <sup>a</sup>
	R <sup>2</sup>	0,899	0,974	0,830	0,984	0,793	0,977	0,795	0,920
<b>EFEECTO DILUCIÓN</b>									
Digestión	Parámetro	Muestra							
		WPC - AM	WPC - CMC	HD WPC - AM	HD WPC - CMC	GB - AM	GB - CMC	HD GB - AM	HD GB - CMC
Fase oral	$\eta_{app}$ (mPa·s)	1178 ± 9 <sup>a</sup>	494 ± 27 <sup>c</sup>	53 ± 6 <sup>e</sup>	395 ± 24 <sup>d</sup>	1103 ± 20 <sup>a</sup>	565 ± 29 <sup>bc</sup>	613 ± 4 <sup>b</sup>	511 ± 29 <sup>c</sup>
	n	0,34 ± 0,01 <sup>b</sup>	0,51 ± 0,04 <sup>a</sup>	0,53 ± 0,06 <sup>a</sup>	0,55 ± 0,04 <sup>a</sup>	0,300 ± 0,002 <sup>b</sup>	0,55 ± 0,04 <sup>a</sup>	0,42 ± 0,02 <sup>ab</sup>	0,51 ± 0,03 <sup>a</sup>
	K(Pa·s <sup>n</sup> )	5,49 ± 0,18 <sup>a</sup>	1,5 ± 0,2 <sup>c</sup>	0,16 ± 0,04 <sup>d</sup>	1,11 ± 0,16 <sup>c</sup>	5,52 ± 0,07 <sup>a</sup>	1,6 ± 0,2 <sup>c</sup>	2,31 ± 0,14 <sup>b</sup>	1,6 ± 0,2 <sup>c</sup>
	R <sup>2</sup>	0,994	0,992	0,986	0,996	0,992	0,996	0,994	0,996
Fase gástrica	$\eta_{app}$ (mPa·s)	165 ± 3 <sup>a</sup>	42 ± 6 <sup>d</sup>	11 ± 4 <sup>e</sup>	53 ± 7 <sup>d</sup>	130,9 ± 0,2 <sup>b</sup>	50 ± 7 <sup>d</sup>	84 ± 5 <sup>c</sup>	58 ± 7 <sup>d</sup>
	n	0,3 ± 0,2 <sup>a</sup>	0,67 ± 0,08 <sup>a</sup>	0,7 ± 0,2 <sup>a</sup>	0,64 ± 0,07 <sup>a</sup>	0,35 ± 0,02 <sup>a</sup>	0,69 ± 0,08 <sup>a</sup>	0,45 ± 0,05 <sup>a</sup>	0,63 ± 0,07 <sup>a</sup>
	K(Pa·s <sup>n</sup> )	0,751 ± 0,009 <sup>a</sup>	0,09 ± 0,03 <sup>d</sup>	0,03 ± 0,02 <sup>d</sup>	0,12 ± 0,04 <sup>d</sup>	0,59 ± 0,03 <sup>b</sup>	0,10 ± 0,03 <sup>d</sup>	0,30 ± 0,05 <sup>c</sup>	0,14 ± 0,04 <sup>d</sup>
	R <sup>2</sup>	0,994	0,993	0,990	0,990	0,994	0,994	0,970	0,991
Fase intestinal	$\eta_{app}$ (mPa·s)	24 ± 3 <sup>a</sup>	9 ± 5 <sup>ab</sup>	4 ± 3 <sup>b</sup>	13 ± 5 <sup>ab</sup>	16 ± 4 <sup>ab</sup>	9 ± 5 <sup>ab</sup>	12 ± 4 <sup>ab</sup>	12 ± 5 <sup>ab</sup>
	n	0,43 ± 0,05 <sup>a</sup>	0,9 ± 0,3 <sup>a</sup>	0,8 ± 0,5 <sup>a</sup>	0,80 ± 0,19 <sup>a</sup>	0,48 ± 0,09 <sup>a</sup>	0,9 ± 0,3 <sup>a</sup>	0,57 ± 0,19 <sup>a</sup>	0,8 ± 0,2 <sup>a</sup>
	K(Pa·s <sup>n</sup> )	0,09 ± 0,02 <sup>a</sup>	0,02 ± 0,02 <sup>ab</sup>	0,011 ± 0,013 <sup>b</sup>	0,02 ± 0,02 <sup>ab</sup>	0,06 ± 0,02 <sup>ab</sup>	0,015 ± 0,015 <sup>ab</sup>	0,04 ± 0,03 <sup>ab</sup>	0,02 ± 0,02 <sup>ab</sup>
	R <sup>2</sup>	0,996	0,977	0,900	0,992	0,994	0,980	0,970	0,988

WPC: Proteína lactosérica; HD WPC: Hidrolizado de proteína lactosérica; GB: Gelatina bovina; HD GB: Hidrolizado de gelatina bovina; AM: Almidón modificado; CMC: Carboximetilcelulosa de sodio. Diferentes superíndices indican diferencias significativas entre las diferentes muestras ( $p < 0,05$ ).

### 3.4 Digestibilidad proteica

La digestibilidad proteica de los alimentos proporciona una visión general de las proteínas disponibles para la absorción, lo que refleja la eficiencia proteica (Srigiripura et al., 2019). El grado de digestibilidad de las proteínas puede ser afectado por distintos factores como las condiciones de preparación, la composición química, la temperatura, el pH o la fuerza iónica del medio. Durante la digestión, existen también reacciones resultantes de las interacciones entre los diferentes componentes de los alimentos y de los componentes de los alimentos y el medio digestivo (sales, ácidos, enzimas, cambios en el pH, temperatura y fuerza iónica) que pueden afectar a la disponibilidad de las proteínas y los nutrientes en general (Lu et al., 2019).

La digestibilidad proteica de las distintas cremas de champiñón enriquecidas con proteínas y con textura modificada se evaluó determinando los contenidos de proteínas solubles, péptidos solubles, y grupos amino libres, antes y durante las diferentes fases de la DGI simulada. Cabe mencionar que la medida de péptidos solubles en 5% TCA incluye péptidos de menos de 10 aminoácidos y aminoácidos libres (Chen et al., 2010), mientras que el contenido de grupos amino libres evalúa la proteólisis ocurrida mediante la medida de los grupos amino libres disponibles de proteínas, péptidos y aminoácidos (Adler-Nissen, 1979). Los resultados obtenidos en estos ensayos se muestran en la Tabla 6. Analizando los datos obtenidos se observó que antes de la digestión, las muestras con WPC presentaron la mayor cantidad de proteínas solubles, mientras que las muestras con HD GB presentaron la menor cantidad.

A pesar de que todas las muestras fueron optimizadas para tener el mismo contenido proteico, la estructura globular, alta solubilidad y menor tamaño de la proteína lactosérica, en comparación con la gelatina, podría llevar a esas pequeñas diferencias obtenidas tras determinar su contenido proteico final mediante el método de Bradford. En ambos casos, las muestras con CMC presentaron valores menores en comparación con las muestras con AM, siendo 1,4 veces mayor en la muestra WPC - AM respecto a la muestra WPC - CMC, y de 1,6 veces mayor en la muestra HD GB - AM en comparación con HD GB - CMC. El contenido en proteínas solubles de todas las muestras disminuyó en la fase oral, lo que podría ser debido a la precipitación de las proteínas solubles por interacciones entre la enzima amilasa y las proteínas (Crosara et al., 2018). También se observó un descenso en la fase gástrica, que podría resultar de la acción de la enzima pepsina, que hidroliza proteínas generando péptidos y amino ácidos que no serían detectables, por su tamaño, con el ensayo de Bradford (Rui et al., 2016). Después de la fase intestinal, el contenido en proteínas solubles aumentó en todas las muestras, debido a la proteólisis llevada a cabo por las enzimas intestinales, mientras que disminuyó para las muestras con WPC, probablemente por la intensa hidrólisis de estas muestras durante la fase intestinal y la generación de pequeños fragmentos proteicos. Respecto a los contenidos de péptidos solubles en TCA y grupos amino libres, en general se observó un aumento gradual conforme avanzaba la digestión, con los mayores valores obtenidos tras la fase intestinal. Estos

resultados concuerdan con los cambios que se producen durante la DGI, ya que durante la fase oral solo actúa la  $\alpha$ -amilasa sobre el almidón, por lo que no se produce una degradación de proteínas. En la etapa gástrica, las proteínas se desnaturalizan y pierden la estructura tridimensional por el efecto del pH ácido del medio y la acción de la pepsina, la cual actúa sobre los enlaces peptídicos de las cadenas proteicas liberando péptidos y aminoácidos. En la etapa intestinal, las endopeptidasas como tripsina y quimotripsina, así como las carboxipeptidasas y aminopeptidasas, continúan la proteólisis liberando pequeños péptidos y aminoácidos libres.

Antes de la digestión y tras las fases oral y gástrica, las muestras con WPC y HD WPC presentaron los mayores valores de péptidos solubles en TCA en comparación con las muestras con GB y HD GB. Esas diferencias fueron más marcadas en la fase gástrica, donde las cantidades de péptidos fueron aproximadamente el doble para las muestras con proteína lactosérica. Sin embargo, las muestras con proteínas no hidrolizadas (WPC y GB) presentaron valores superiores a los de las proteínas hidrolizadas al final de la fase intestinal. Las muestras WPC - AM y WPC - CMC presentaron el mayor contenido, con valores de 78 mg/g para WPC - AM y de 68 mg/g para WPC - CMC, mientras que las muestras GB - AM y GB - CMC mostraron valores de 60 y 64 mg/g respectivamente. La muestra HD GB - CMC presentó la menor cantidad (24 mg/g) entre todas las muestras, correspondiendo a un valor 1,75 veces menor que en HD GB - AM. Estos resultados evidencian el destacado papel de las enzimas intestinales, principalmente tripsina y quimotripsina, en la hidrólisis de las proteínas intactas y la generación de péptidos de pequeño tamaño (menores de 10 residuos) y aminoácidos.

En cuanto al contenido de grupos amino libres, se observó que antes de la digestión y tras las fases oral y gástrica, las muestras con hidrolizados proteicos como fuente de proteína (HD WPC y HD GB) presentaron valores más altos en comparación a las muestras WPC y GB, lo que sería resultado de la mayor cantidad de péptidos y aminoácidos presentes en los hidrolizados comparado con las proteínas intactas. Sin embargo, tras la fase intestinal, la cantidad de grupos amino libres fue superior en las muestras con proteína intacta (WPC y GB), en concordancia con los resultados obtenidos para los péptidos solubles. Respecto a las muestras con proteína lactosérica, no se obtuvieron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre las muestras WPC - AM, WPC - CMC y HD WPC - AM al final de la DGI, mientras que HD WPC - CMC presentó el menor valor (33 mg/g). En el caso de las muestras con gelatina, GB - AM presentó la mayor cantidad (60 mg/g) y HD GB - CMC la menor cantidad (30 mg/g). Estos resultados evidencian que la digestibilidad proteica podría verse comprometida al utilizar hidrolizados y CMC como fuente de proteína e hidrocoloide, respectivamente.

Los resultados obtenidos en los estudios de digestibilidad proteica evidencian variaciones entre las muestras, no solo debidas a la adición de proteína en forma intacta o hidrolizada, sino también resultantes de la influencia de los hidrocoloides añadidos y las interacciones proteína-hidrocoloide en la matriz alimentaria (Srigiripura et al., 2019). Se ha demostrado que la proteína lactosérica puede interactuar con el almidón al introducirse dentro de la matriz interna del mismo. Esto podría deberse al

agrietamiento y al hinchamiento del almidón gelatinizado, permitiendo que la matriz de proteína continua se disperse con inclusiones discontinuas de almidón (Yang et al., 2019). Por otro lado, las moléculas de CMC, al ser un polisacárido aniónico, pueden interactuar con WPC a través de fuerzas de atracción electrostáticas a pH neutro y pH ligeramente ácido, llevando a la formación de complejos solubles de proteína-polisacárido (Koupantsis et al., 2009). También se reportó en el trabajo de Burgardt et al. (2014) que la adición de CMC a las proteínas de leche provoca la formación de una estructura más rugosa y particulada lo que ayuda al fortalecimiento de la estructura. Así pues, la mayor interacción entre proteína e hidrocoloide aniónico (CMC) respecto a hidrocoloide neutro (AM) podría explicar los resultados obtenidos de digestibilidad proteica. En cuanto a la gelatina, cuando esta se somete a alta temperatura se produce la desnaturalización de su estructura en triple hélice, por la ruptura de los enlaces de hidrógeno, y al enfriarse se forman pequeños segmentos de dos o tres cadenas polipeptídicas que forman de nuevo las zonas de unión de la triple hélice (Fonkwe et al., 2003). La adición de CMC a la gelatina podría minimizar las modificaciones conformacionales de las cadenas de triple hélice de la proteína, protegiendo la estructura formada contra la desnaturalización y haciéndola más estable (Bazid et al., 2015). Respecto a las propiedades de los hidrolizados de proteínas, Severin et al. (2006) indicaron que la hidrólisis enzimática de WPC dio como resultado, péptidos con diferentes grupos hidrófobos y cargados, que pueden generar muchos tipos de interacciones. El aumento de la carga neta en los hidrolizados de proteínas también podría dar como resultado un aumento de la repulsión de las cargas entre los péptidos. Para que las proteínas formen estructuras estables hay que lograr un equilibrio crítico de fuerzas atractivas y repulsivas lo que explica las diferencias interacciones de los hidrolizados de proteínas obtenidos con la AM y la CMC.

**TABLA 6.** Concentración de proteínas solubles, péptidos solubles en 5% TCA, grupos amino libres de las diferentes muestras antes y durante la digestión gastrointestinal simulada.

Parámetro	Fase de digestión	Muestra							
		WPC - AM	WPC - CMC	HD WPC - AM	HD WPC - CMC	GB - AM	GB - CMC	HD GB - AM	HD GB - CMC
Proteínas solubles (mg/g)	Antes	18,5 ± 0,3 <sup>a</sup>	12,8 ± 0,2 <sup>b</sup>	4,22 ± 0,16 <sup>cd</sup>	4,72 ± 0,06 <sup>c</sup>	4,3 ± 0,2 <sup>cd</sup>	3,17 ± 0,16 <sup>d</sup>	2,7 ± 0,2 <sup>e</sup>	1,73 ± 0,12 <sup>f</sup>
	Oral	11,8 ± 0,3 <sup>a</sup>	11,3 ± 0,3 <sup>a</sup>	2,072 ± 0,117 <sup>bc</sup>	3,0 ± 0,3 <sup>b</sup>	2,0 ± 0,3 <sup>bc</sup>	2,260 ± 0,102 <sup>bc</sup>	0,19 ± 0,02 <sup>d</sup>	1,23 ± 0,16 <sup>cd</sup>
	Gástrica	5,4 ± 0,4 <sup>a</sup>	4,6 ± 0,3 <sup>a</sup>	1,12 ± 0,09 <sup>b</sup>	1,35 ± 0,16 <sup>b</sup>	0,29 ± 0,05 <sup>c</sup>	0,62 ± 0,07 <sup>bc</sup>	0,59 ± 0 <sup>bc</sup>	0,922 ± 0,116 <sup>bc</sup>
	Intestinal	3,9 ± 0,3 <sup>b</sup>	3,0 ± 0,3 <sup>b</sup>	6,04 ± 0,14 <sup>a</sup>	6,5 ± 0,5 <sup>a</sup>	6,8 ± 0,5 <sup>a</sup>	7,3 ± 0,2 <sup>a</sup>	7,3 ± 0,2 <sup>a</sup>	3,8 ± 0,4 <sup>b</sup>
Péptidos solubles (mg/g)	Antes	9,6 ± 0,3 <sup>a</sup>	5,87 ± 0,09 <sup>c</sup>	10,51 ± 0,09 <sup>a</sup>	7 ± 0 <sup>b</sup>	4,0 ± 0,6 <sup>d</sup>	4,4 ± 0,2 <sup>d</sup>	4,06 ± 0,09 <sup>d</sup>	5 ± 0 <sup>cd</sup>
	Oral	10,2 ± 0,3 <sup>a</sup>	5,56 ± 0,09 <sup>b</sup>	9,8 ± 0,3 <sup>a</sup>	10,7 ± 0,2 <sup>a</sup>	5,2 ± 0,18 <sup>b</sup>	5,24 ± 0,18 <sup>b</sup>	3,8 ± 0,2 <sup>c</sup>	4 ± 0 <sup>bc</sup>
	Gástrica	23,3 ± 0,5 <sup>b</sup>	21 ± 2 <sup>b</sup>	24,38 ± 0,13 <sup>b</sup>	29,8 ± 0,4 <sup>a</sup>	9,8 ± 0,4 <sup>d</sup>	10,4 ± 0,4 <sup>d</sup>	11,9 ± 0,2 <sup>d</sup>	16,1 ± 0,2 <sup>c</sup>
	Intestinal	78,1 ± 0,6 <sup>a</sup>	68 ± 7 <sup>ab</sup>	37,4 ± 1,9 <sup>cd</sup>	33 ± 3 <sup>cd</sup>	60 ± 3 <sup>b</sup>	64,1 ± 1,2 <sup>b</sup>	42 ± 2 <sup>c</sup>	24 ± 2 <sup>d</sup>
Grupos amino libres (mg/g)	Antes	4,52 ± 0,18 <sup>cd</sup>	3,43 ± 0,12 <sup>d</sup>	15 ± 2 <sup>a</sup>	11,6 ± 0,5 <sup>b</sup>	2,82 ± 0,05 <sup>d</sup>	3,77 ± 0,17 <sup>d</sup>	10,97 ± 0,02 <sup>b</sup>	7,88 ± 1,05 <sup>bc</sup>
	Oral	7,25 ± 0,09 <sup>c</sup>	6,0 ± 0,5 <sup>c</sup>	14,0 ± 0,3 <sup>a</sup>	10,3 ± 1,6 <sup>b</sup>	3,079 ± 0,117 <sup>d</sup>	2,8 ± 0,2 <sup>d</sup>	11,7 ± 0,6 <sup>ab</sup>	10,7 ± 0,2 <sup>b</sup>
	Gástrica	24,8 ± 1,9 <sup>c</sup>	30,6 ± 0,6 <sup>b</sup>	41,5 ± 0,9 <sup>a</sup>	41,53 ± 0,03 <sup>a</sup>	18,0 ± 1,2 <sup>d</sup>	13,4 ± 0,2 <sup>e</sup>	29,7 ± 0,8 <sup>b</sup>	29,5 ± 0,2 <sup>b</sup>
	Intestinal	63,5 ± 1,5 <sup>a</sup>	66 ± 4 <sup>a</sup>	62 ± 5 <sup>a</sup>	42,9 ± 1,7 <sup>c</sup>	60,00 ± 1,06 <sup>ab</sup>	49,1 ± 1,7 <sup>bc</sup>	49,1 ± 1,9 <sup>bc</sup>	30 ± 2 <sup>d</sup>

WPC: Proteína lactosérica; HD WPC: Hidrolizado de proteína lactosérica; GB: Gelatina bovina; HD GB: Hidrolizado de gelatina bovina; AM: Almidón modificado; CMC: Carboximetilcelulosa de sodio. Diferentes superíndices indican diferencias significativas entre las diferentes muestras ( $p < 0,05$ ).

## 4. CONCLUSIONES

El desarrollo de un nuevo producto enriquecido y con textura modificada para personas mayores requiere del análisis de los parámetros reológicos y viscoelásticos, así como de la evaluación de la digestibilidad proteica para comprobar su adecuación a las necesidades de este grupo de población. En general, las muestras preparadas con AM como espesante presentaron valores más altos de umbral de fluencia comparados con las muestras que contenían CMC en su formulación, reflejando la capacidad de los gránulos de almidón de reforzar la red de proteínas al dispersarse en ella y actuar como relleno en esta red. Asimismo, todas las muestras exhibieron un comportamiento de gel débil, sugiriendo la posibilidad de ser utilizadas en el tratamiento de personas con problemas de deglución, siendo especialmente importante durante el envejecimiento. La combinación del análisis reológico y de digestibilidad proteica durante una digestión gastrointestinal simulada permitió revelar más información sobre la interacción entre las distintas fuentes de proteína utilizadas y los hidrocoloides añadidos. Las muestras WPC - AM y GB - AM fueron las más afectadas a nivel reológico por las condiciones gastrointestinales, sin embargo, las muestras con hidrolizados proteicos y CMC fueron las que presentaron una menor digestibilidad proteica.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, la Agencia Estatal de Investigación, y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional, por el apoyo financiero proporcionado a través del Proyecto RTI2018-098842-B-I00.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Adler-Nissen, J. 1979. Determination of the degree of hydrolysis of food protein hydrolysates by trinitrobenzenesulfonic acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 27(6): 1256-1262.
- Agyemang, P. N.; Akonor, P. T.; Tortoe, C.; Johnsona, P. N. T.; Manu-Aduening, J. 2020. Effect of the use of starches of three new ghanaiian cassava varieties as a thickener on the physicochemical, rheological and sensory properties of yoghurt. *Scientific African*, 9.
- Álvarez, M. D.; Canet, W. 2013. Dynamic viscoelastic behavior of vegetable-based Infant purees. *Journal of Texture Studies*, 44(3): 205–224.
- Álvarez, M. D.; Fuentes, R.; Guerrero, G.; Canet, W. 2017. Characterization of commercial spanish hummus formulation: nutritional composition, rheology, and structure. *Internatinal Journal of Food Properties*, 20(4):845–863.
- AOAC, 1990. Association of official analytical chemist. official methods of analysis, 15th edn. Washington D.C, USA.
- Augusto, P. E.; Cristianini, M.; barz, A. 2012. Effect of temperature on dynamic and steady-state shear rheological properties of siriguela (*Spondias purpurea* L.) pulp. *Journal of Food Engineering*, 108(2):283–289.

- Bazid, S.; el Kolli, M.; Medjahed, A.; Doufnoune, R. 2015. The interaction of sodium carboxymethylcellulose with gelatin in the absence and presence of NaCl, CaCl<sub>2</sub> and glucose. *Journal of Polymer Engineering*, 35(1): 89-98.
- Bradford, M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1): 248-254.
- Brodkorb, A.; Egger, L.; Alminger, M.; Alvito, P.; Assunção, R.; Ballance, S.; Bohn, T.; Bourlieu-lacanal, C.; Boutrou, R.; Carrière, F.; Clemente, A.; Corredig, M.; Dupont, D.; Dufour, C.; Edwards, C.; Golding, M.; Karakaya, S.; Kirkhus, B.; Feunteun, S. L.; Recio, I. 2019. Infogest static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion. *Nature protocols*, 14, 24.
- Brooks, L.; Liao, J.; Ford, J.; Harmon, J.; Breedveld, V. 2021. Thickened liquids using pureed foods for children with dysphagia: IDDSI and rheology measurements. *Dysphagia*.
- Burgardt, V.; Oliveira, D.; Evseev, I.; Coelho, A.; Haminiuk, C.; Waszczynskyj, N. 2014. Influence of concentration and pH in caseinomacropeptide and carboxymethylcellulose interaction. *Food Hydrocolloids*, 35:170-180.
- Chen, C.; Shih, Y. C.; Chiou, P.; Yu, B. 2010. Evaluating nutritional quality of single stage- and two stage-fermented soybean meal. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 23(5):598-606.
- Chen, L.; Nsor-atindana, J.; Goff, H. D.; Zhang, W.; Mao, J.; Zhong, F. 2020. The effect of viscous soluble dietary fiber on nutrient digestion and metabolic responses I : *In vitro* digestion process. *Food Hydrocolloids*, 107, 105971.
- Cho, H. M.; Yoo, B. 2015. Rheological characteristics of cold thickened beverages containing xanthan gum-based food thickeners used for dysphagia diets. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 115(1):106-111.
- Crosara, K.; Zuanazzi, D.; Moffa, E.; Xiao, Y.; Machado, M.; Siqueira, W. L. 2018. Revealing the amylase interactome in whole saliva using proteomic approaches. *BioMed Research International*.
- Fonkwe, L. G.; Narsimhan, G.; Cha, A. S. 2003. Characterization of gelation time and texture of gelatin and gelatin-polysaccharide mixed gels. *Food Hydrocolloids*, 17(6):871-883.
- Haboubi, N. 2010. Assessment and management of nutrition in older people and its importance to health. *Clinical Interventions in Aging*, 207.
- Herranz, B.; Criado, C.; Pozo-Bayón, M. N.; Álvarez, M. D. 2021. Effect of addition of human saliva on steady and viscoelastic rheological properties of some commercial dysphagia-oriented products. *Food Hydrocolloids*, 111, 106403.
- Ishihara, S.; Nakauma, M.; Funami, T.; Odake, S.; Nishinari, K. 2011. Swallowing profiles of food polysaccharide gels in relation to bolus rheology. *Food Hydrocolloids*, 25(5):1016-1024.
- Iqbal, S.; Zhang, P.; Wu, P.; Ge, A.; Ge, F.; Deng, R.; Chen, X. D. 2021. Evolutions of rheology, microstructure and digestibility of parboiled rice during simulated semi-dynamic gastrointestinal digestion. *Food Science and Technology*, 148, 111700.
- Irani, M.; Razavi, S. M.; Abdel-Aal, E. S. M.; Hucl, P.; Patterson, C. A. 2019. Viscoelastic and textural properties of canary seed starch gels in comparison with wheat starch gel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124:270-281.
- Izidoro, D. R.; Scheer, A. P.; Sierakowski, M. R.; Haminiuk, C. W. 2008. Influence of green banana pulp on the rheological behaviour and chemical characteristics of emulsions (mayonnaises). *Food Science and Technology*, 41(6):1018-1028.
- Jancikova, S.; Jamróz, E.; Kulawik, P.; Tkaczewska, J.; Dordevic, D. 2019. Furcellaran/gelatin hydrolysate/rosemary extract composite films as active and intelligent packaging materials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 131:19-28.
- Ketnawa, S.; Ogawa, Y. 2019. Evaluation of protein digestibility of fermented soybeans and changes in biochemical characteristics of digested fractions. *Journal of Functional Foods*, 52:640-647.
- Kim, S. G.; Yoo, W.; Yoo, B. 2014. Effect of thickener type on the rheological properties of hot thickened soups suitable for elderly people with swallowing difficulty. *Preventive Nutrition and Food Science*, 19(4):358-362.

- Koupantsis, T.; Kiosseoglou, V. 2009. Whey protein–carboxymethylcellulose interaction in solution and in oil-in-water emulsion systems. Effect on emulsion stability. *Food Hydrocolloids*, 23(4):1156-1163.
- Lentle, R. G.; Janssen, P. W. M.; Asvarujanon, P.; Chambers, P.; Stafford, K. J.; Hemar, Y. (2007). High definition mapping of circular and longitudinal motility in the terminal ileum of the brushtail possum *Trichosurus vulpecula* with watery and viscous perfusates. *Journal of Comparative Physiology*, 177(5):543-556.
- Lin, T.; Fernández-Fraguas, C. 2020. Effect of thermal and high-pressure processing on the thermo-rheological and functional properties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours. *Food Science and Technology*, 127, 109325.
- Lu, Y.; Mao, L.; Hou, Z.; Miao, S.; Gao, Y. 2019. Development of emulsion gels for the delivery of functional food ingredients: from structure to functionality. *Food Engineering Reviews*, 11(4):245-258.
- Malinauskytė, E.; Ramanauskaitė, J.; Keršienė, M.; Jasutienė, I.; Leskauskaitė, D.; Devold, T. G.; Vegarud, G. E. 2018. Impact of interfacial composition on emulsion digestion using *in vitro* and *in vivo* models. *Journal of Food Science*, 83(11):2850-2857.
- Malinauskytė, E.; Ramanauskaitė, J.; Leskauskaitė, D.; Devold, T.G.; Schüller, R. B.; Vegarud, G. E. 2014. Effect of human and simulated gastric juices on the digestion of whey proteins and carboxymethylcellulose-stabilised O/W emulsions. *Food Chemistry*, 165: 104–112.
- Morell, P.; Fiszman, S.; Llorca, E.; Hernando, I. 2017. Designing added-protein yogurts: Relationship between *in vitro* digestion behavior and structure. *Food Hydrocolloids*, 72: 27-34.
- Minekus, M.; Alminger, M.; Alvito, P.; Ballance, S.; Bohn, T.; Bourlieu, C.; Carrière, F.; Boutrou, R.; Corredig, M.; Dupont, D.; Dufour, C.; egger, L.; Golding, M.; Karakaya, S.; Kirkhus, B.; Le feunteun, S.; Lesmes, U.; Macierzanka, A.; Mackie, A.; Brodkorb, A. 2014. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food – an international consensus. *Food Function*, 5(6):1113-1124.
- Nakauma, M.; Ishihara, S.; Funami, T.; Nishinari, K. 2011. Swallowing profiles of food polysaccharide solutions with different flow behaviors. *Food Hydrocolloids*, 25(5):1165–1173.
- Park, J.; Yoo, B. 2020. Particle agglomeration of gum mixture thickeners used for dysphagia diets. *Journal of Food Engineering*, 279, 109958.
- Ribes, S.; Estarriaga, R.; Grau, R.; Talens, P. 2021. Physical, sensory, and simulated mastication properties of texture-modified Spanish sauce using different texturing agents. *Food & Function*, 12(17) :8181–8195.
- Rui, X.; Xing, G.; Zhang, Q; Zare, F.; Li, W.; Dong, M. 2016. Protein bioaccessibility of soymilk and soymilk curd prepared with two *Lactobacillus plantarum* strains as assessed by *in vitro* gastrointestinal digestion. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 38:155-159.
- Satusap, P.; Chavasit, V.; Kriengsinyos, W.; Judprasong, K. 2014. Development of cereal and legume-based food products for the elderly. *Springer Plus*, 3(1):451-458.
- Severin, S.; Xia, W. 2006. Enzymatic hydrolysis of whey proteins by two different proteases and their effect on the functional properties of resulting protein hydrolysates. *Journal of Food Biochemistry*, 30(1):77-97.
- Sharma, M.; Kristo, E.; Corredig, M.; Duizer, L. 2017. Effect of hydrocolloid type on texture of pureed carrots: Rheological and sensory measures. *Food Hydrocolloids*, 63, 478–487.
- Srigiripura, C. V.; Kotebagilu, N. P.; Urooj, A. 2019. *In Vitro* starch and protein digestibility of disease specific nutrition formulations. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 7(1):66-74.
- Suebsaen, K.; Suksatit, B.; Kanha, N.; Laokuldilok, T. 2019. Instrumental characterization of banana dessert gels for the elderly with dysphagia. *Food Bioscience*, 32, 100477.
- Talens, P.; Castells, M.; Verdú, S.; Barat, J.; Grau, R. 2021. Flow, viscoelastic and masticatory properties of tailor made thickened pea cream for people with swallowing problems. *Journal of Food Engineering*, 292, 110265.
- Vieira, J.M.; Oliveira Jr, F. D.; Salvarob, D. B.; Maffezzoli, G.P.; Mello, J.D.B.; Vicente, A.; Cunha, R.L. 2020. Rheology and soft tribology of thickened dispersions aiming the development of oropharyngeal dysphagia-oriented products. *Current research in food science*:19-29

- Vu Dang, H.; Loisel, C.; Desrumaux, A. ; Doublier, J. 2009. Rheology and microstructure of cross-linked waxy maize starch/whey protein suspensions. *Food Hydrocolloids*, 23(7): 1678–1686.
- Yang, C.; Zhong, F.; Douglas Goff, H.; Li, Y. 2019. Study on starch-protein interactions and their effects on physicochemical and digestible properties of the blends. *Food Chemistry*, 280:51-58.