



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
y del Medio Natural

Caracterización del proceso de elaboración de yogur de
soja mediante análisis de imagen por dispersión laser

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos

AUTOR/A: Vicent Ibáñez, Lucía

Tutor/a: Grau Meló, Raúl

Director/a Experimental: Verdú Amat, Samuel

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

TÍTULO: Caracterización del proceso de elaboración de “yogur de soja” mediante análisis de imagen por dispersión láser

RESUMEN:

El creciente interés por productos de origen vegetal ha impulsado el desarrollo de alternativas a los lácteos tradicionales, como el “yogur de soja”, tanto por motivos de sostenibilidad como por su percepción como opción más saludable. Aunque su elaboración es similar a la del yogur convencional, las diferencias entre materias primas afectan a propiedades clave como la textura, un parámetro fundamental para la aceptabilidad del consumidor.

El presente estudio tuvo como objetivo caracterizar la evolución textural de tres formulaciones de yogur de soja: una sin aditivos, otra con cloruro cálcico y otra con cloruro cálcico más goma xantana, mediante el análisis tradicional con texturómetro y una técnica óptica basada en imagen por dispersión láser que permite realizar un monitoreo continuo, con el fin de validar esta última como alternativa no destructiva y fiable. Se evaluaron parámetros como pH, firmeza y consistencia durante el proceso de fermentación y el almacenamiento refrigerado.

Los resultados mostraron que la formulación con calcio más goma xantana presentó la textura más firme y estable, seguida de la que contenía solo calcio, mientras que la muestra sin aditivos fue la que mostró una estructura menos compacta. Además, los datos obtenidos mediante análisis de imagen mostraron una elevada correlación con los resultados del texturómetro, permitiendo predecir con precisión los parámetros texturales a partir de esta técnica. Estos resultados confirman el potencial del análisis por dispersión láser como herramienta no invasiva para el control de calidad en productos fermentados de origen vegetal.

Palabras clave: Yogur de soja; alternativa vegetal; fermentación; textura; análisis de imagen; dispersión láser

Autora: Lucía Vicent Ibáñez

Tutor Académico: Prof. D. Raúl Grau Meló

Director Experimental: D. Samuel Verdú Amat

Valencia, Julio 2025

TÍTOL: Caracterització del procés d'elaboració de "iogurt de soja" mitjançant anàlisi d'imatge per dispersió làser

RESUM:

El creixent interès per productes d'origen vegetal ha impulsat el desenvolupament d'alternatives als lactis tradicionals, com el iogurt de soja, tant per motius de sostenibilitat com per la seua percepció com a opció més saludable. Encara que la seua elaboració és similar a la del iogurt convencional, les diferències entre matèries primeres afecten propietats clau com la textura, un paràmetre fonamental per a l'acceptabilitat del consumidor.

El present estudi va tindre com a objectiu caracteritzar l'evolució textural de tres formulacions de iogurt de soja: una sense additius, una altra amb clorur càlcic i una altra amb clorur càlcic més goma xantana, mitjançant l'anàlisi tradicional amb texturòmetre i una tècnica òptica basada en imatge per dispersió làser que permet realitzar controls en continu, amb la finalitat de validar esta última com a alternativa no destructiva i fiable. Es van avaluar paràmetres com pH, fermesa i consistència durant el procés de fermentació i l'emmagatzematge refrigerat.

Els resultats van mostrar que la formulació amb calci més goma xantana va presentar la textura més ferma i estable, seguida de la que contenia només calci, mentres que la mostra sense additius va ser la que va mostrar una estructura menys compacta. A més, les dades obtingudes mitjançant anàlisis d'imatge van mostrar una elevada correlació amb els resultats del texturòmetre, permetent predir amb precisió els paràmetres de textura a partir d'esta tècnica. Estos resultats confirmen el potencial de l'anàlisi per dispersió làser com a ferramenta no invasiva per al control de qualitat en productes fermentats d'origen vegetal.

Paraules clau: iogurt de soja; alternativa vegetal; fermentació; textura; anàlisi d'imatge; dispersió làser

Autora: Lucía Vicent Ibáñez

Tutor Acadèmic: Prof. D. Raúl Grau Meló

Director Experimental: D. Samuel Verdú Amat

València, Juliol 2025

TITTLE: Monitoring of “soy yogurt” processing by laser scattering image analysis

The growing interest in plant-based products has driven the development of alternatives to traditional dairy products, such as soy yogurt, motivated by both sustainability concerns and their perception as a healthier option. Although its production is similar to that of conventional yogurt, differences in raw materials affect key properties such as texture, a fundamental parameter for consumer acceptance.

This study aimed to characterize the textural evolution of three soy yogurt formulations—one without additives, one with calcium chloride, and another with calcium chloride plus xanthan gum—using conventional texture analysis (texturometer) and an optical technique based on laser backscattering imaging that perform continuous measurements, with the goal of validating the latter as a reliable and non-destructive alternative. Parameters such as pH, firmness and consistency were evaluated during fermentation and refrigerated storage.

The results showed that the formulation with calcium and xanthan gum exhibited the firmest and most stable texture, followed by the one containing only calcium, while the sample without additives showed the least compact structure. Moreover, the data obtained through image analysis showed a strong correlation with the results from the texturometer, enabling accurate prediction of textural parameters using this technique. These findings confirm the potential of laser backscattering analysis as a non-invasive tool for quality control in fermented plant-based products.

Keywords: Soy yogurt; plant-based alternative; fermentation; texture; image análisis; laser diffraction

Author: Lucía Vicent Ibáñez

Academic Tutor: Prof. D. Raúl Grau Meló

Experimental Director: D. Samuel Verdú Amat

Valencia, July 2025

ÍNDICE

1. RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030	1
2. INTRODUCCIÓN	1
3. OBJETIVOS.....	5
3.1. Objetivo general	5
3.2. Objetivos específicos	5
4. MATERIALES Y MÉTODOS	6
4.1. Materia prima	6
4.2. Proceso elaboración yogur	6
4.3. Determinación carga microbiológica del fermento	7
4.4. Medición del pH	8
4.5. Determinación de la textura	8
4.6. Determinación de la sinéresis durante el almacenamiento	9
4.7. Análisis óptico mediante transmisión láser	9
4.8. Procesado de imágenes y datos	10
4.9. Análisis estadístico.....	11
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	12
5.1. Características fisicoquímicas.....	12
5.1.1. Características fisicoquímicas durante el cuajado	12
5.1.2. Estabilidad fisicoquímica del yogur durante su conservación	16
5.2. Caracterización del cuajado mediante análisis de imagen por dispersión láser	19
5.3. Evaluación láser del yogur durante su conservación	23
5.4. Correlación entre los datos procedentes del análisis fisicoquímico y del láser	24
6. CONCLUSIONES	26
7. BIBLIOGRAFÍA.....	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dispositivo de captura de imagen de dispersión laser (A). Extracción y procesado de datos (B).	10
Figura 2. Evolución de la acidez del yogur medida a través del pH. (A) disminución del pH a lo largo del tiempo para cada formulación, incluyendo el ajuste modelizado de la curva. (B) primera deriva del pH (dpH) en función del valor de pH, como estimación de la velocidad de acidificación.	12
Figura 3. Evolución de los parámetros texturales en función del pH durante la fermentación para las tres formulaciones. (A) Consistencia; (B) Firmeza; (C) Cohesión; (D) Índice de viscosidad.	13
Figura 4. Evolución del pH de las distintas formulaciones de yogur vegetal durante su conservación en refrigeración a los 1, 5 y 7 días.	16
Figura 5. Evolución de los parámetros de textura de las formulaciones C, Ca y Gx durante el almacenamiento refrigerado para 1, 5 y 7 días. (A) Firmeza; (B) Consistencia; (C) Cohesión; (D) Índice de viscosidad.	17
Figura 6. Aspecto visual de las tres formulaciones de yogur de soja tras 7 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C).	18
Figura 7. Evolución de la sinéresis, expresada como variación de peso (%), en las distintas formulaciones de yogur de soja durante el almacenamiento en refrigeración (día 1, día 5 y día 7).	19
Figura 8. Visualización de la sinéresis superficial en las tres formulaciones de yogur de soja tras 7 días de almacenamiento en refrigeración. Las muestras se colocaron ligeramente inclinadas para facilitar la observación del suero liberado.	19
Figura 9. Representación de los datos ópticos obtenidos mediante láser durante la fermentación para las tres formulaciones. (A-C) espectros completos de intensidad luminosa al inicio y al final del proceso fermentativo para las formulaciones C, Ca y Gx respectivamente; (D-F) evolución de la intensidad de los cinco píxeles representativos en función del pH para las tres formulaciones.	20
Figura 10. Imágenes captadas por la cámara al inicio y al final (pH 4,5) de la fermentación de yogur de soja en diferentes formulaciones. Se indican los cinco píxeles seleccionados para el análisis de la transmisión de luz láser.	21
Figura 11. Análisis de Componentes Principales para los datos de láser. Evolución de la componente principal 1 (PC1) durante la fermentación para las tres formulaciones en función del tiempo de cuajado (A) y del pH (B). (C) Primera derivada de la PC1 en función del tiempo de cuajado (A) y del pH (B). (C) Primera derivada de la PC1 en función del pH, marcado en azul el punto de mayor cambio.	22
Figura 12. Análisis de componentes principales (PCA) de las imágenes por retrodispersión láser de las tres formulaciones de yogur de soja durante el almacenamiento (días 1,5 y 7).	24
Figura 13. Diagramas de paridad del modelo SVM obtenido para (A) firmeza, (B) consistencia e (C) índice de viscosidad, a partir de las variables ópticas registradas mediante imágenes láser.	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación Objetivos de Desarrollo Sostenible	1
Tabla 2. Recuento microbiológico (log UFC/g) de estreptococos, lactobacillus y aerobios totales en muestras de yogur de soja dentro y fuera de su fecha de consumo preferente.	8
Tabla 3. Ecuaciones y coeficientes de determinación (R^2) obtenidos para cada formulación y parámetro textural	15
Tabla 4. Parámetros estadísticos del modelo SVM para firmeza, consistencia y cohesión, en condiciones de cuajado y tras almacenamiento en refrigeración. ...	25

1. RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030

Tabla 1. Relación Objetivos de Desarrollo Sostenible

Objetivo de Desarrollo Sostenible	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. Fin de la pobreza				X
ODS 2. Hambre cero			X	
ODS 3. Salud y bienestar	X			
ODS 4. Educación de calidad				X
ODS 5. Igualdad de género				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento			X	
ODS 7. Energía asequible y no contaminante				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico			X	
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles				X
ODS 12. Producción y consumo responsables	X			
ODS 13. Acción por el clima		X		
ODS 14. Vida submarina				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.				X

Este proyecto contribuye al cumplimiento de 3 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

ODS 3. Salud y bienestar

Este ODS busca garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades. El presente trabajo contribuye a este objetivo mediante el desarrollo de un alimento vegetal fermentado a base de soja, con potenciales beneficios nutricionales, especialmente para personas con intolerancia a la lactosa, alergias a proteínas lácteas o que siguen dietas vegetarianas o veganas. De este modo, se ofrece como una alternativa saludable que favorece el acceso a una alimentación segura y adaptada a diferentes necesidades. La soja, como materia prima, es un alimento funcional rico en proteínas completas, fibra dietética, vitaminas, minerales y compuestos bioactivos con efectos positivos sobre la salud cardiovascular y metabólica. Además, a lo largo del TFG se han evaluado parámetros como el pH, la textura y la sinéresis, para garantizar un producto estable, seguro y sensorialmente aceptable para el consumidor.

ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras

Este ODS incluye como objetivo: “Fomentar la innovación, aumentar la investigación científica, mejorar las infraestructuras tecnológicas e industriales...”.

El trabajo incorpora un enfoque novedoso para la evaluación de la textura del yogur, utilizando técnicas de análisis de imagen combinadas con iluminación láser. Esta metodología ofrece una vía alternativa a los métodos convencionales, con potencial para optimizar los procesos de control de calidad en la industria alimentaria. La integración de este tipo de herramientas tecnológicas no solo favorece la mejora de la precisión de los análisis, sino que también impulsa la adopción de soluciones innovadoras aplicables a otros productos y entornos de investigación. De esta forma, se contribuye a fortalecer las infraestructuras científico-tecnológicas dentro del ámbito agroalimentario, alineándose con el objetivo de promover una industria más avanzada y basada en el conocimiento.

ODS 12. Producción y consumo responsables

La elaboración de un yogur vegetal responde a la creciente demanda de productos más sostenibles y con menor impacto ambiental que los de origen animal. El uso de materia prima vegetal, como la soja, permite reducir la huella ecológica en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de agua y uso del suelo. Además, el estudio de la estabilidad del producto durante el almacenamiento contribuye a optimizar su vida útil y a minimizar el desperdicio alimentario, alineándose con los principios de una producción responsable.

2. INTRODUCCIÓN

El yogur es un producto lácteo fermentado ampliamente consumido por su valor nutricional y beneficios para la salud, como la mejora de la digestión, la actividad antimicrobiana o la reducción del colesterol. Su alto contenido proteico y la presencia de aminoácidos esenciales lo convierten en un alimento funcional muy valorado (Chandan, Gandhi, & Shah, 2017). Se define como “el producto de leche coagulada obtenido por fermentación láctica mediante la acción de *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus* (...) con o sin la adición de otros ingredientes lácteos” (Real Decreto 271/2014, 2014).

Durante este proceso de fermentación, los microorganismos transforman la lactosa en ácido láctico, lo que provoca una disminución progresiva del pH, desde aproximadamente 6,7 hasta valores en torno a 4,5. Esta acidificación reduce la carga negativa de las micelas de caseína, lo que disminuye la repulsión electrostática y favorece las interacciones hidrofóbicas y de atracción entre proteínas que da lugar a la gelificación de la leche, confiriéndole al yogur su textura semisólida característica (Lee & Lucey, 2010).

Sin embargo, en muchos países occidentales se ha registrado una disminución notable en el consumo de productos lácteos tradicionales, tanto por cambios en los hábitos alimentarios como por una percepción cada vez más crítica hacia estos alimentos. Una de las razones de este descenso en el consumo lácteo está vinculada a cuestiones de salud, siendo la intolerancia a la lactosa una de las más prevalentes a nivel mundial, afectando a una gran parte de la población. Esta condición puede provocar molestias gastrointestinales como hinchazón, diarrea o dolor abdominal. Además, la alergia a las proteínas de la leche de vaca representa otro factor relevante, ya que puede desencadenar reacciones alérgicas que, en algunos casos, son potencialmente graves (Harper et al., 2022; Islam et al., 2021).

Otro motor importante de este cambio es la creciente preocupación por el impacto ambiental y ético asociado a la ganadería lechera. Este tipo de producción contribuye de forma significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero, al consumo excesivo de agua y a la degradación del suelo, lo que ha despertado una mayor conciencia medioambiental entre los consumidores. A ello se le suma la inquietud por el bienestar animal, cada vez más presente en las decisiones de compra de muchos individuos. Todos estos factores, así como una nueva percepción creciente de que la leche es un alimento “poco saludable”, están llevando a muchas personas a buscar alternativas vegetales. Estas alternativas se perciben como opciones más naturales, menos procesadas y más alineadas con estilos de vida saludables, activos o veganos (Harper et al., 2022; McCarthy et al., 2017).

Las bebidas vegetales requieren menos energía para su elaboración y generan menores emisiones de gases de efecto invernadero por gramo de proteína en comparación con las leches animales (González et al., 2011), lo que las posiciona como una alternativa interesante para quienes buscan reducir su impacto ambiental. Asimismo, se tratan de una opción adecuada para individuos con restricciones médicas, ya que carecen de lactosa y de los principales alérgenos presentes en la leche de vaca (Wang et al., 2023). Por lo general, presentan un menor contenido graso, destacando su bajo nivel de grasas saturadas, lo cual las convierte en una alternativa interesante para quienes buscan reducir la ingesta de este tipo de lípidos. Además, estas bebidas pueden ser formuladas para incluir fibra dietética, lo que aporta beneficios nutricionales adicionales ausentes en la leche de origen animal (Mäkinen et al., 2016; Clegg et al., 2021).

En función de su materia prima, las bebidas vegetales sustitutivas de la leche pueden clasificarse en cinco grandes grupos: cereales, leguminosas, frutos secos, semillas y pseudocereales (Silva, Silva y Ribeiro, 2020). Dentro de estas, la bebida elaborada a partir de soja representa la alternativa vegetal más consumida, dado que esta leguminosa constituye una fuente nutricionalmente destacada por su elevado contenido en proteínas, lípidos, fibra, vitaminas y minerales. Cabe señalar que la proteína de soja es la única proteína vegetal completa equiparable a las proteínas de origen animal, debido a su perfil de aminoácidos (Clegg et al., 2021). La soja contiene cantidades apreciables de ácidos grasos poliinsaturados, como el ácido linoleico y el ácido linolénico, junto con diversos compuestos fitoquímicos de interés biológico, entre los que se incluyen ácidos fenólicos, isoflavonas, saponinas y fitoesteroles, asociados con efectos beneficiosos como la disminución de los niveles de colesterol y la reducción del riesgo de enfermedades cardiovasculares (Nakatani et al., 2018; Sethi et al., 2016).

Sin embargo, a pesar del notable crecimiento global del mercado de bebidas de origen vegetal, que en los últimos años ha superado en lanzamientos a los productos lácteos tradicionales como la leche de vaca, estas alternativas continúan enfrentándose a importantes limitaciones. Uno de los principales desafíos radica en sus propiedades sensoriales, frecuentemente percibidas como inferiores en comparación con sus equivalentes de origen animal, lo que repercute negativamente en su aceptación por parte del consumidor (Jaeger, Dupas de Matos, Oduro, & Hort, 2024). En el caso específico de la bebida de soja, se ha reportado la presencia de sabores característicos a “frijol” o “pintado”, derivados de la actividad enzimática de la lipoxigenasa, que generan rechazo (Jaeger & Giacalone, 2021).

Esta brecha sensorial se acentúa particularmente en productos vegetales que buscan replicar matrices lácteas consolidadas, como el yogur. Los consumidores tienden a tener expectativas sensoriales predefinidas, en términos de apariencia, olor, sabor y textura, que los productos vegetales no siempre logran satisfacer. Así lo demuestran estudios comparativos en los que tanto adultos como niños

mostraron una clara preferencia por la leche de vaca sin lactosa frente a su alternativa de soja (Jaeger & Giacalone, 2021).

Otro aspecto a considerar es que las alternativas a la leche de origen vegetal, como la soja, generalmente presentan un contenido mineral significativamente inferior al de la leche de vaca. Por este motivo, es habitual que se fortifiquen con el objetivo de mejorar su perfil nutricional y poder emplearse como sustitutos de la leche (Jaeger et al., 2024). Un ejemplo claro es el calcio, un nutriente esencial para el crecimiento y el desarrollo, cuya principal fuente dietética son los productos lácteos. Aunque la leche de soja contiene cantidades equivalentes de proteínas a la leche de vaca, solo aporta una quinta parte del calcio. Por ello, la fortificación con este mineral se ha convertido en una práctica común en la preparación de bebidas vegetales para asegurar a los consumidores que alcancen sus necesidades nutricionales y reduzcan la necesidad de suplementos (Sethi et al. 2016). Es más, un estudio reciente señaló que la bebida de soja fortificada con calcio es la que presenta una mayor similitud con la leche de vaca en cuanto a su composición de macronutrientes, como proteínas, carbohidratos y grasas (Silva, Silva y Ribeiro, 2020).

En este contexto, el objetivo de lograr productos de origen vegetal que se asemejen lo máximo posible a los yogures tradicionales, tanto nutricional como organolépticamente, ha llevado a la necesidad de modificaciones en las formulaciones y la implementación de nuevos procesos tecnológicos, como la adición mineral de calcio mencionada anteriormente o el control preciso de las condiciones de fermentación para optimizar la textura, estabilidad y perfil nutricional de estos productos. Estas mejoras han hecho que sea tal la similitud de los productos de origen vegetal con el yogur, que la Unión Europea legislase reservando el término “yogur” para aquellos productos lácteos de origen animal, si bien los consumidores seguimos refiriéndonos a este tipo de productos como “yogur de...”, en este caso de soja.

No obstante, en aras de mejorar el control de los procesos productivos, desarrollar nuevos productos y optimizar el procesado, cambios que pueden influir en la estructura del gel, la disponibilidad de nutrientes o las propiedades sensoriales del producto, se hace necesario desarrollar herramientas que puedan evaluar de manera rigurosa su evolución durante el procesado y comprender el impacto de estas modificaciones para garantizar la calidad del producto y la aceptación del consumidor (Sethi et al. 2016).

Existen múltiples técnicas destinadas a la evaluación de los procesos involucrados en la elaboración de alimentos, como puede ser del yogur. Estas técnicas pueden clasificarse, de forma general en destructivas y no destructivas. Tradicionalmente, los métodos más empleados han sido de carácter destructivo, ya que requieren la alteración o el muestreo directo del sistema, lo que limita su aplicabilidad en líneas de producción continua (Martí Sala, 2021).

En la actualidad, el desarrollo de tecnologías analíticas más avanzadas ha impulsado el interés por métodos no destructivos, los cuales permiten una monitorización en línea sin interferir en el proceso. La implementación de estas técnicas ha contribuido a mejoras significativas en aspectos como la seguridad alimentaria, la eficiencia económica y la optimización temporal. Entre las técnicas no destructivas más utilizadas se encuentran los sistemas basados en la variación de conductividad, el uso de ultrasonidos, la impedancia acústica y el análisis de imagen (Verdú, Barat, & Grau, 2019).

En particular, el análisis de imagen constituye una herramienta altamente versátil, con un amplio abanico de técnicas debido a la posibilidad de combinar distintos elementos ópticos y configuraciones. Entre sus principales ventajas destacan su elevado grado de automatización y la capacidad para realizar análisis *in line*, lo que facilita su integración directa en procesos industriales sin interferir en el flujo de producción. Estas técnicas permiten, además, la detección simultánea de múltiples propiedades físicas o estructurales del producto. El análisis de imagen puede utilizarse de forma independiente o en combinación con otras tecnologías basadas en principios distintos, incrementando así su aplicabilidad.

Dentro del conjunto de técnicas ópticas aplicadas a sistemas alimentarios se incluyen desde métodos basados en colorimetría, hasta aquellos que analizan parámetros ópticos como la transmitancia, la absorbancia o la reflectancia de la luz.

Una de las técnicas no destructivas más prometedoras para monitorizar la formación de gel en yogures vegetales es el análisis de imagen por dispersión láser, conocida como “Light Backscatter”. El procedimiento consiste en dirigir un haz de luz coherente (láser) sobre la muestra, al interactuar con la matriz del alimento, la luz se dispersa y genera un patrón de difracción característico. Mediante cámaras o sensores digitales se capturan imágenes de ese patrón, del cual se extraen descriptores numéricos, como la intensidad. La luz transmitida aporta información sobre la morfología interna del gel, mientras que los fotones retrodispersores reflejan cambios en la microestructura y la turbidimetría del sistema (Vicens Mira, 2019).

La versatilidad del análisis de imagen por dispersión láser ha permitido su aplicación en múltiples campos. En el ámbito médico, empleado para la determinación del volumen y concentración de hemoglobina, así como en odontología para la detección de caries. En el sector agroalimentario, se ha utilizado para estimar parámetros de calidad como el contenido en sólidos solubles y la firmeza en manzanas, así como para monitorizar el proceso de cuajado en la elaboración de quesos (Vicens Mira, 2019).

En conjunto, el método ofrece varias ventajas clave: es completamente no destructivo, captura grandes volúmenes de datos de forma rápida y simultánea, y presenta un coste relativamente bajo frente a otros sistemas de alta precisión. Estas características lo convierten en una herramienta idónea para evaluar la evolución textural de los yogures de soja durante la fermentación.

Así, y en base a lo expuesto, resulta interesante considerar su posible aplicación en el control no destructivo, e incluso en línea, de procesados de bebidas vegetales, como el “yogur de soja”.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es evaluar si la técnica de análisis de imagen basada en la dispersión láser puede ser utilizada como herramienta no destructiva que en continuo pueda monitorizar y caracterizar la textura de productos generados a partir de bebidas vegetales como los comúnmente denominados “yogures de soja”.

3.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos en este estudio se encuentran:

- Evaluar la evolución textural de tres formulaciones de yogur de soja tanto durante el proceso de fermentación como a lo largo de su almacenamiento en refrigeración.
- Comparar el efecto del calcio y la goma xantana sobre la firmeza y la consistencia del yogur vegetal. Analizar su influencia permitirá determinar en qué medida contribuyen a mejorar la estructura del yogur de soja, y si su uso combinado o individual aporta ventajas significativas en comparación con la formulación control, que no contiene estos aditivos.
- Valorar la utilidad del análisis de imagen por dispersión láser como herramienta para el seguimiento del proceso de gelificación en productos fermentados como el yogur vegetal. Evaluar su aplicabilidad en este tipo de matrices puede contribuir a validar su uso como alternativa eficiente y precisa frente a métodos tradicionales, especialmente en el control de calidad y el desarrollo de nuevos productos en la industria alimentaria.
- Correlacionar los resultados obtenidos mediante técnicas tradicionales de análisis de textura, como el texturómetro, con los datos generados a partir del análisis de imagen por dispersión láser. Establecer dicha correlación es fundamental para validar la capacidad del análisis por imagen como herramienta útil en la caracterización textural de productos fermentados de origen vegetal.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materia prima

Para la realización del presente estudio se empleó una bebida comercial ecológica de soja sin azúcares ni sal añadidos, y sin aditivos, obtenida en un supermercado local (Consum). Según la información presente en el etiquetado, esta contenía agua y haba de soja ecológica (14,5%). Como inóculo se utilizó un postre fermentado de soja (“yogur de soja sin azúcar”) obtenido en un supermercado local (Mercadona), el cual y según su etiquetado contenía fermentos bifidus y acidophilus.

Además, para desarrollar las diferentes formulaciones, se utilizaron los aditivos goma xantana (Scharlab) y cloruro cálcico (Scharlab).

4.2. Proceso elaboración yogur

Para la elaboración del producto, se mezclaron la bebida vegetal, una vez precalentada a unos 40 °C y el fermento comercial de soja en una proporción de 100 g de fermento por cada L de bebida de soja.

La mezcla inoculada se homogeneizó y se distribuyó en dos tipos de envases, aquel que contendría la muestra para ser evaluada mediante la técnica laser (recipiente tradicional de yogur) y aquellos destinados a las medidas de textura mediante texturómetro. En este último caso se utilizaron recipientes transparentes de 28 mm de diámetro y 50 mm de altura en los que se introdujo 30 mL por unidad. Una vez rellenados todos los envases, en el caso de aquellos destinados a las medidas de textura se colocaron en un baño termostático a 42 °C, donde permanecieron hasta alcanzar un pH final de 4,5, momento en el cual se consideró finalizado el proceso de fermentación y formación del yogur (Penna et al., 2007; Saint-Eve et al., 2008). En el caso de la muestra evaluada por láser, esta se incorporó en el equipo de medida el cual estaba también termostático a 42 °C, realizándose una medida en continuo hasta la llegar al mismo pH. Este protocolo se aplicó a la formulación control (C), sin aditivos.

Con el objetivo de evaluar el efecto de la presencia de calcio en la estabilidad del gel, se elaboró una segunda formulación (Ca) en la que se incorporó cloruro cálcico (0.06 %). Este se disolvió en la bebida vegetal tras su precalentamiento y, a continuación, se incorporó el inóculo, siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente (Yazici, Álvarez, & Hansen, 2006).

Por último, con la finalidad de contrarrestar el posible efecto desestabilizante que la presencia de calcio podría tener sobre el producto, se desarrolló una tercera formulación (Gx), en la cual se añadió goma xantana (0.005 %) junto con el cloruro cálcico. El objetivo era analizar su posible sinergia en la formación del gel y en la mejora de la textura final del producto (El-Sayed, Abd El-Gawad, Murad, & Sallam, 2002).

Además del estudio durante el cuajado del “yogur de soja” también se evaluó su estabilidad en refrigeración aproximadamente a 3 °C. Para ello se prepararon muestras (C, Ca y Gx) en ambos tipos de recipientes las cuales fueron evaluadas tanto texturalmente como mediante la técnica laser al día siguiente de la elaboración (día 1), a los cinco días y a los siete días. El objetivo fue estudiar la evolución de parámetros que permitan valorar la estabilidad del producto a lo largo del tiempo de almacenamiento en función de la incorporación de Ca y Ca + Gx.

4.3. Determinación carga microbiológica del fermento

Con el objetivo de evaluar la cantidad de microorganismos viables presentes en el inóculo utilizado para la elaboración del yogur de soja y su estabilidad a lo largo del periodo de comercialización, se realizó una determinación de la carga microbiana el día de compra (con el mayor número de días de comercialización) y el día de fecha de caducidad.

Para el análisis microbiológico se utilizaron tres medios de cultivo: M17 (selectivo para *Streptococcus thermophilus*), MRS (específico para *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus*) y PCA (Plate Count Agar), este último como medio general para el recuento de bacterias aerobias mesófilas. Todos los medios fueron preparados en autoclave siguiendo las indicaciones del fabricante.

De cada tipo de yogur (día de compra y fin de comercialización) se realizaron dos repeticiones. Se pesaron 10 gramos de muestra y se depositaron en bolsas estériles de Stomacher, añadiendo posteriormente 90 mL de agua de peptona estéril (1:10). Las muestras fueron homogeneizadas durante 1 minuto mediante un equipo Stomacher. A partir del homogenizado inicial se realizaron diluciones decimales seriadas hasta 10^{-8} , utilizando tubos con 9 mL de agua de peptona estéril y transfiriendo 1 mL de cada dilución al siguiente tubo.

Las siembras se realizaron a partir de las diluciones 10^{-4} , 10^{-5} y 10^{-6} mediante la técnica de vertido en profundidad (*pour plate*). Para ello, se colocó 1 mL de cada dilución en placas Petri estériles, a las que se añadió el medio fundido y atemperado correspondiente. Tras una adecuada homogeneización, las placas se dejaron solidificar y se incubaron en posición invertida. Las placas con medio PCA se incubaron a 30 °C durante 48 horas, mientras que las correspondientes a MRS y M17 se incubaron a 37 °C durante el mismo periodo, en condiciones aerobias.

Una vez finalizado el periodo de incubación, se procedió al recuento de colonias desarrolladas en las placas, seleccionando aquellas en las que el crecimiento permitía una cuantificación clara y precisa. El número de unidades formadoras de colonias (UFC) por gramo de muestra se calculó teniendo en cuenta el factor de dilución correspondiente. Los resultados obtenidos se expresaron en log UFC/g y se recogen en la Tabla 2. Como puede observarse, los resultados fueron constantes durante toda la fase de comercialización lo cual permitía poder utilizar estos como

fermentos a lo largo de este periodo, siendo la dosis, como se ha comentado anteriormente de 100 g de fermento por cada L de bebida de soja.

Tabla 2. Recuento microbiológico (log UFC/g) de estreptococos, lactobacillus y aerobios totales en muestras de yogur de soja dentro y fuera de su fecha de consumo preferente.

	Estreptococos (log UFC/g)	Lactobacilos (log UFC/g)	Aerobios totales (log UFC/g)
Yogur día de compra	8,281	5,837	6,267
Yogur fin comercialización	8,427	5,804	5,929

4.4. Medición del pH

La determinación del pH se realizó con la finalidad de evaluar la evolución del proceso de fermentación en las distintas formulaciones de yogur de soja. El pH es un parámetro clave, ya que su disminución progresiva indica un aumento de la acidez debido a la actividad metabólica de las bacterias lácticas. Esta acidificación está directamente relacionada con la desestabilización de las proteínas y la formación de la red gelificada responsable de la textura final del producto. Por tanto, el seguimiento del pH permitió establecer el punto de finalización del proceso fermentativo (Lee & Lucey, 2010).

La evolución del pH durante el proceso de fermentación se monitorizó mediante un pHmetro Mettler Toledo SevenEasy, realizando mediciones periódicas cada 15-20 minutos hasta alcanzar un valor final de pH 4,5 que marcó el final del proceso de gelificación del yogur (Penna et al., 2007; Saint-Eve et al., 2008).

4.5. Determinación de la textura

El análisis de textura se llevó a cabo utilizando un texturómetro TA.XTplus (Stable Micro Systems), equipado con una célula de carga de 50 kg. Se empleó un disco cilíndrico de retroextrusión (25 mm de diámetro) que ejercía compresión sobre la superficie del producto a una velocidad de 1,00 mm/s. Este análisis se realizó en momentos concretos a lo largo del proceso de fermentación, permitiendo evaluar la evolución textural del gel, aunque no de forma continua. También se aplicó durante el periodo de almacenamiento del producto, realizándose medidas a las 24 horas de la elaboración, a los cinco días y a la semana, siguiendo el mismo protocolo empleado durante la fermentación. Cada punto de análisis se midió por triplicado, con el objetivo de aumentar la representabilidad de los datos obtenidos.

Para la adquisición y tratamiento de los datos se utilizó el software Exponent Stable Micro Systems (Versión 6,2,4,0), el cual permitió obtener parámetros fisicoquímicos como fuerza máxima (N) y fuerza mínima (N), así como el área positiva (N*s) y área negativa (N*s), los cuales se correlacionan con la firmeza, la cohesión, la consistencia y el índice de viscosidad, respectivamente (Mazurkevičiūtė, Matulytė, & Žilius, 2022).

4.6. Determinación de la sinéresis durante el almacenamiento

Como parámetro de estabilidad, se evaluó la sinéresis o separación del suero, entendida como la expulsión de la fase líquida desde la matriz del gel. Se trata de un defecto tecnológico relevante en los productos fermentados de base láctea y, por extensión, en alternativas vegetales como el yogur de soja.

Para la determinación de la sinéresis se empleó una balanza analítica (Sartorius), con la que se registró en primer lugar el peso del yogur con el suero presente en su superficie. A continuación, se retiró cuidadosamente el líquido superficial mediante una jeringa de aguja y, finalmente, se volvió a pesar la muestra. De este modo, la sinéresis se cuantificó como la diferencia de peso entre ambas mediciones.

4.7. Análisis óptico mediante transmisión láser

El sistema óptico empleado se diseñó con el fin de monitorizar de forma no destructiva y continua la evolución del cuajado del yogur vegetal durante su fermentación. El dispositivo constaba de una cámara digital (Logitech C922 Pro Stream Webcam) para la captura de imágenes, un láser de luz roja (650 nm, 50 mW de potencia y 3 mm de diámetro), y un soporte que permitía la correcta colocación del envase con el yogur a analizar (Figura 1 A).

Este soporte incorporaba un sistema de recirculación de agua caliente mediante una bomba, que permitía mantener la muestra a una temperatura constante de 42 °C durante todo el proceso de fermentación.

El conjunto del sistema se ubicó en el interior de una cabina oscura, diseñada para eliminar cualquier interferencia proveniente de fuentes externas de luz y garantizar así condiciones de análisis estables. El láser se situó por debajo del soporte, proyectando el haz verticalmente a través del centro de la muestra, mientras que la cámara se posicionó directamente encima, alineada con el puntero láser y el soporte de la muestra (Figura 1 A). La distancia entre el láser y la muestra fue de 20 cm y entre la cámara y muestra, de 15 cm.

Durante la fermentación, se capturaron imágenes de video de manera continua, lo que permitió registrar en tiempo real la evolución de la interacción de la luz láser con la matriz del producto.

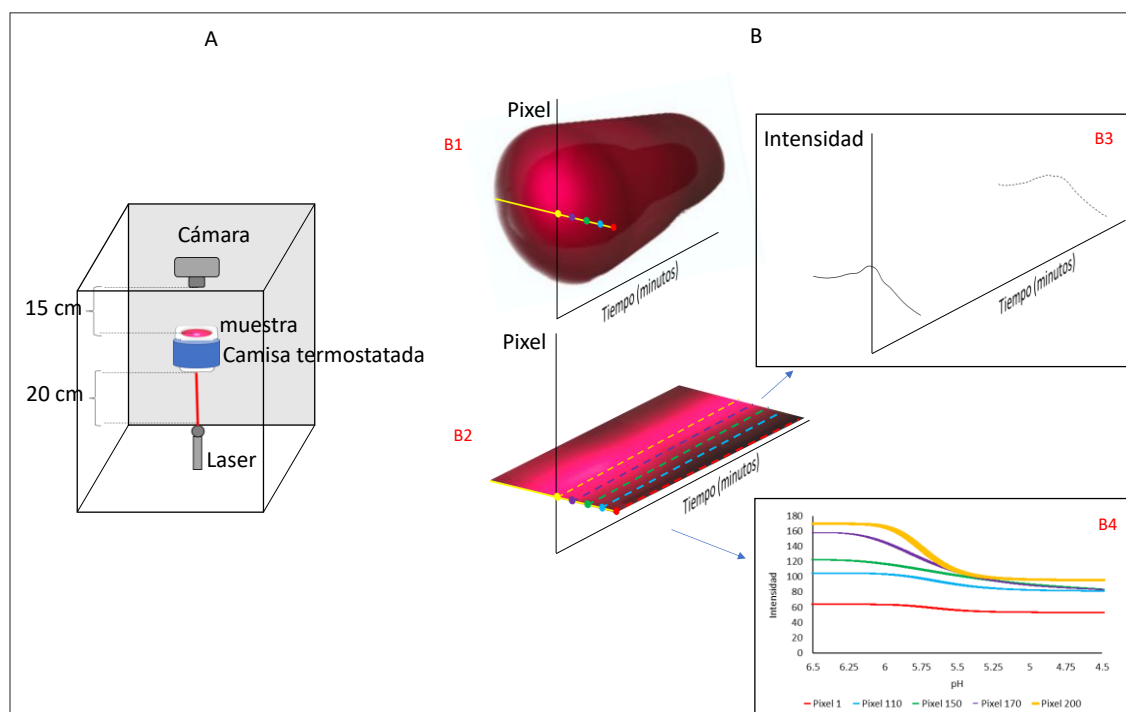


Figura 1. (A) Dispositivo de captura de imagen de dispersión laser. (B) Extracción y procesamiento de datos.

4.8. Procesado de imágenes y datos

Los datos obtenidos a partir de las imágenes se analizaron con el fin de estudiar la evolución de la intensidad luminosa generada por el láser al atravesar la matriz del producto durante el proceso de fermentación. A medida que avanza la formación del gel, los sistemas proteicos presentes en la soja comienzan a agregarse, dando lugar a una estructura más densa y opaca. Este fenómeno reduce la transmisión de luz a través del medio debido al incremento de la dispersión y la absorción, lo que se refleja en una disminución progresiva de la intensidad captada por la cámara. Este comportamiento óptico ofrece una herramienta no invasiva para monitorizar la evolución estructural del yogur, permitiendo explorar la posible correlación entre la atenuación de la señal luminosa y los cambios texturales del producto.

Para el procesamiento de las imágenes, los videos fueron segmentados obteniéndose una imagen cada 20 s. Con este proceso se reduce el volumen de información que se tiene que procesar. Obtenidas las imágenes se formó un stack con ellas (Figura 1 B1) al que se le seleccionó una línea de pixeles como si se

realizase un corte transversal, situado en la zona central de la muestra (Figura 1 B2). Mediante esta acción se pretende reducir más aun la cantidad de información a procesar. Esta línea de píxeles obtenida a lo largo del proceso de cuajado representa la evolución que sufren estos durante el proceso (Figura 1 B3) y que se definen como espectro de intensidad a cada tiempo. De este espectro, y con el fin de evaluar de una forma visual cómo evolucionan los píxeles a lo largo del cuajado, se seleccionaron ciertos píxeles. Estos fueron el píxel 1, 110, 150, 170 y 200, siendo este último el píxel situado en la región central (Figura 1 B4)

Para extraer los datos de las imágenes de vídeo se utilizó el programa ImageJ Fiji, un software de código abierto que permite procesar y analizar secuencias de imágenes y vídeos de forma precisa y eficiente.

4.9. Análisis estadístico

Para la realización del trabajo se realizaron 4 réplicas, siendo el número de muestras evaluadas en cada punto de toma de muestra, y para cada tipo de yogur, de 3. En el análisis estadístico de los datos obtenidos, se utilizaron diferentes técnicas dependiendo del tipo de información y de los objetivos planteados.

En primer lugar, para comparar las medias de los valores pH y de los distintos parámetros fisicoquímicos (firmeza, consistencia, cohesión y índice de viscosidad), medidos en las muestras de yogur de soja, tanto durante el cuajado como durante el almacenamiento, así como de la sinéresis, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de 0,05. Cuando se encontraron diferencias significativas entre las medias, se llevó a cabo una comparación múltiple mediante el test de diferencia significativa más pequeña (LSD), para identificar qué grupos eran estadísticamente diferentes. Estos análisis se realizaron utilizando el software Statgraphics Centurion 18.

Por otro lado, para el análisis de los datos obtenidos mediante la técnica de imagen láser, que genera una gran cantidad de información debido al número de píxeles y al tiempo de registro, en un inicio se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA), el cual reduce las dimensiones de las variables perdiendo la menor cantidad de información, obteniendo nuevas que son combinación de las anteriores, denominadas componentes, y encontrando direcciones en el espacio que maximicen la varianza (Trecet, y col., 2019). En esta acción se pretendió evaluar de forma global la evolución de la señal láser en los tres tipos de yogur de soja a lo largo del cuajado. Se trabajó con el espectro completo y sin diferenciar las formulaciones con el fin de reducir la dimensionalidad del conjunto de datos y visualizar agrupamientos espontáneos entre las distintas formulaciones, detectando así relaciones o patrones entre las muestras. Previamente al PCA, se normalizaron los espectros láser con el fin de eliminar efectos asociados a las diferencias iniciales dentro de cada formulación y poder analizar la posible variación dependiente de la formulación. Los valores medios de las PCs entre las diferentes formulaciones a diferentes tiempos del cuajado también se evaluaron mediante el test ANOVA.

Este mismo procedimiento se realizó para las muestras en refrigeración durante 1, 5 y 7 días.

Finalmente, para evaluar la relación entre los datos láser y los parámetros de textura, y en su caso poder obtener un modelo predictivo, se desarrollaron modelos matemáticos empleando el modelo de regresión “Super Vector Machine” (SVM) el cual permite capturar relaciones no lineales. Los resultados se evaluaron en términos del coeficiente de calibración (C) y de validación cruzada (CV).

Tanto el preprocesado de datos como los modelos multivariados PCA y SVM se realizaron empleando el paquete informático PLS Toolbox, 6.3 (Eigenvector Research Inc., Wenatchee, Washington, EE. UU.), una extensión de la caja de herramientas en el entorno computacional Matlab 7.6 (The Mathworks, Natick, Massachusetts, EE. UU.).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Características fisicoquímicas

5.1.1. Características fisicoquímicas durante el cuajado

La evolución del pH para las tres formulaciones a lo largo del proceso de fermentación, así como la velocidad a la que se produce este cambio (primera derivada), se muestra en la Figura 2.

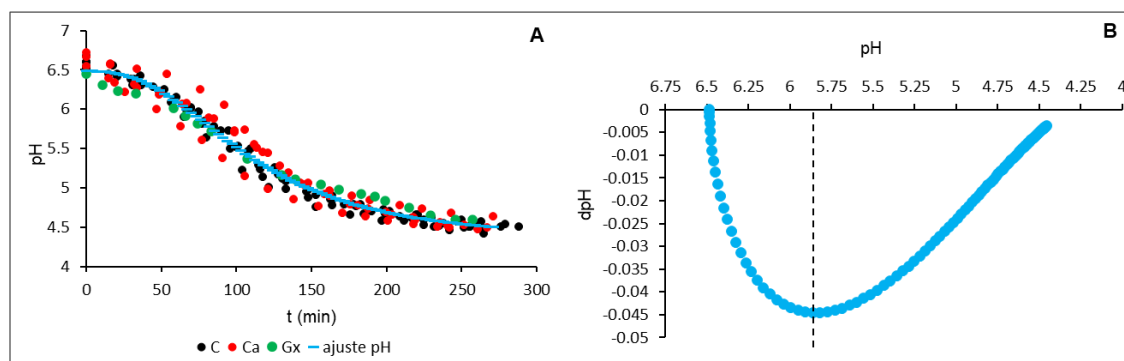


Figura 2. Evolución de la acidez del yogur medida a través del pH. (A) Disminución del pH a lo largo del tiempo para cada formulación, incluyendo el ajuste modelizado de la curva. (B) Primera derivada del pH (dpH) en función del valor de pH, como estimación de la velocidad de acidificación.

Como se observa en la Fig. 2A, dicha evolución fue muy similar para las tres formulaciones (C, Ca y Gx), produciéndose un descenso del pH prácticamente a la misma velocidad en los tres casos. Este resultado estaría evidenciando la no influencia del calcio y la goma en el desarrollo de los microorganismos fermentativos, siendo el sustrato fermentable común en todas ellas, lo que implica que la actividad de las bacterias responsables del proceso se desarrolló de forma

comparable. En términos generales, la fermentación se inició con valores de pH cercanos a 6,5 y, tras aproximadamente 250-270 minutos, se alcanzó un pH de 4,5, valor que marcó el final del proceso fermentativo y la formación del gel característico del yogur. Tanto el valor de tiempo total invertido como el valor de pH final alcanzado fueron similares a los observados por otros investigadores en yogures de leche (Sfakianakis et al., 2015)

En la Fig. 2B se representa la primera derivada (dpH) en función del valor de pH, como estimación de la velocidad a la que se produce dicha variación. Se observa que el cambio más importante ocurre en torno a $\text{pH} \approx 5,8$, donde el valor de dpH alcanzó el punto de inflexión. Este punto coincide aproximadamente con los primeros 100 minutos de fermentación y marca el momento de mayor velocidad de acidificación (Sfakianakis et al., 2015). Por tanto y de forma similar a la de la leche, los componentes de la leche de soja fomentaron el crecimiento de bacterias específicas generando el cuajado de esta (Gou & Yang, 2015).

Las propiedades mecánicas; firmeza, consistencia, cohesión e índice de viscosidad, relacionadas con la textura del yogur durante su etapa de cuajado y evaluadas mediante el ensayo de extrusión se presentan en la Figura 3.

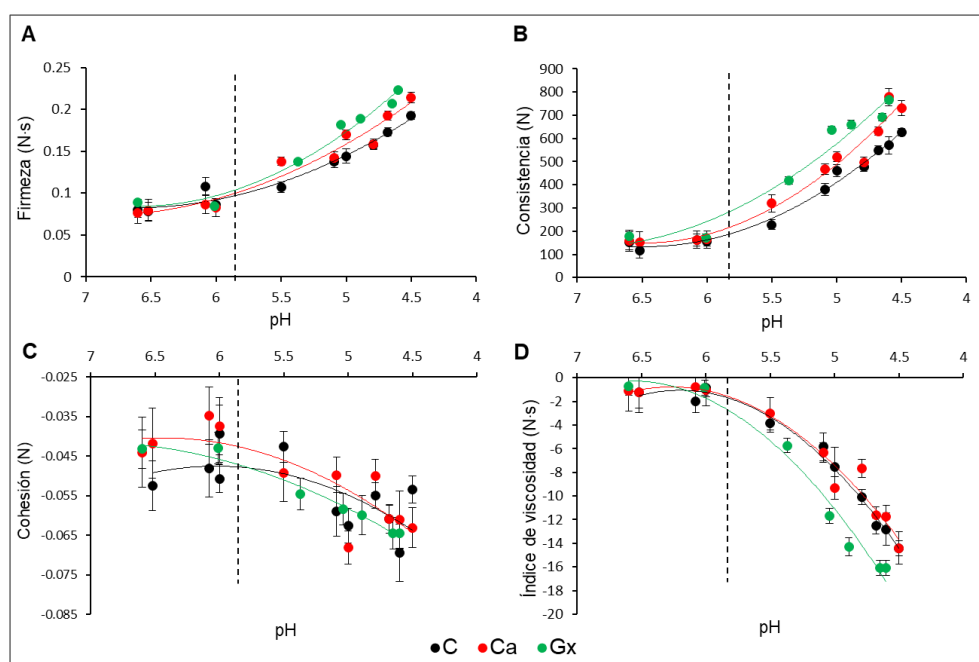


Figura 3. Evolución de los parámetros texturales en función del pH durante la fermentación para las tres formulaciones. (A) Firmeza; (B) Consistencia; (C) Cohesión; (D) Índice de viscosidad.

Como se observa en las Figuras 3A y 3B, tanto la firmeza como la consistencia del yogur aumentaron progresivamente a medida que disminuía el pH y avanzaba el tiempo de fermentación. Este comportamiento se atribuye a la desnaturalización de las proteínas de la bebida de soja y a la formación de una red tridimensional que confiere estructura al gel, proceso que se intensifica conforme se alcanza el punto isoeléctrico de las proteínas, favoreciendo la agregación proteica y el desarrollo de la textura característica del yogur (Lucey & Singh, 1997). En efecto, las dos

proteínas más importantes, que pueden separarse mediante ultracentrifugación, en la leche de soja son la glicinina (11S), con un punto isoeléctrico cercano a 5, y la β -conglucina (β CG, 7S), compuesto por las subunidades α' , α y β , con puntos isoeléctricos de 4,90, 5,18 y 5,66-6, respectivamente (Pizones Ruíz-Henestrosa et al., 2009; Mulalapele & Xi, 2021). Estas proteínas constituyen aproximadamente el 30 % y el 40 % del total de proteínas de soja, respectivamente (Qin, Wang, & Luo, 2022). Por lo tanto, el descenso del pH provoca su desnaturalización y formación de la red tridimensional. Ese reordenamiento de las proteínas se daría fundamentalmente a pH en torno a 5,8, como se ha observado en el punto de inflexión de la variación de pH (Fig. 2B) y se observa con el incremento de la firmeza y consistencia.

Al comparar las tres formulaciones, se observó que, en términos generales, la evolución de la firmeza y la consistencia fue similar, mostrando una tendencia asintótica en su incremento. No obstante, la muestra con adición de cloruro cálcico mostró una textura ligeramente superior a la muestra control durante la etapa de cuajado.

Este efecto podría explicarse por la interacción de calcio con las proteínas principales de la soja, como glicinina y la β -conglucina. Según Yin et al. (2024), los iones Ca^{2+} ayudan a reducir las cargas negativas de estas proteínas, lo que disminuye la repulsión entre ellas y favorece su agregación, permitiendo la formación de una red proteica más compacta y consistente en las primeras fases del proceso. Lucey y Singh (1997) también señalaron que la incorporación de sales cálcicas puede intensificar la firmeza del gel en etapas iniciales, ya que los iones calcio actúan como puentes que unen distintas cadenas polipeptídicas, fortaleciendo así la estructura del gel durante la coagulación.

Por otro lado, la incorporación de goma xantana (formulación Gx) mostró una mejora aún más significativa en la firmeza y consistencia del producto. Este efecto se atribuye a la capacidad de la goma xantana para interactuar con las proteínas de la matriz del yogur, fortaleciendo la red gelificada y mejorando la retención de agua, lo que se traduce en una textura más firme y estable (El-Sayed et al., 2002).

La goma xantana es uno de los polisacáridos microbianos más importantes a nivel industrial, ampliamente utilizado en la industria alimentaria como agente espesante y estabilizante. Destaca por su capacidad para generar soluciones de alta viscosidad incluso a bajas concentraciones y por su estabilidad en un amplio rango de pH y temperaturas, lo que la hace especialmente adecuada para productos como el yogur. (El-Sayed et al., 2002).

La Figura 3C representa los valores de cohesión para las distintas formulaciones. En productos como el yogur, la cohesión se refiere a la capacidad del gel para resistir la separación de su estructura interna cuando se aplica una fuerza, se define como la fuerza negativa registrada durante el análisis, medida directa de la cohesión del gel (Hurler, Engesland, Kermay, & Škalko-Basnet, 2011). Sin embargo, el diseño experimental utilizado en este estudio no fue suficiente para detectar diferencias concluyentes en este parámetro entre las muestras. Es posible que la concentración de aditivos no fuese lo suficientemente diferenciadora o que el método de análisis empleado no tuviera la sensibilidad adecuada.

La figura 3D muestra los valores del índice de viscosidad para las tres formulaciones. El índice de viscosidad se define como la resistencia interna al flujo que presenta un fluido cuando se le aplica una fuerza, cuanto mayor es la viscosidad, más fuerza se necesita para que el fluido fluya (Mazurkevičiūtė, Matulytė, & Žilius, 2022). Los resultados obtenidos indican que las formulaciones C y Ca presentaron valores de viscosidad estadísticamente similares. En el caso de la formulación Gx, se observó un ligero incremento. Este comportamiento puede atribuirse al efecto estabilizante de la goma xantana, la cual contribuye a mejorar la retención de agua y la estructura tridimensional del gel, favoreciendo su viscosidad (Castillo et al., 2020).

Estos resultados coinciden con lo observado durante el seguimiento del pH en la Figura 2, ya que todos los parámetros de textura comienzan a presentar variaciones más marcadas alrededor de un pH de 4,8 (marcado con una línea negra discontinua en la Figura 3).

A partir de las curvas de tendencia ajustadas que se muestran en la Figura 3, se obtuvieron las correspondientes ecuaciones matemáticas y sus coeficientes de determinación (R^2), que reflejan el grado de ajuste del modelo a los datos experimentales. En la Tabla 3 se recopilan dichas ecuaciones y valores de R^2 . Dada la bondad del ajuste de las ecuaciones (altos valores de R^2), estas pueden ser utilizadas para reflejar el parámetro de textura a cualquier tiempo del procesado. En este sentido, las ecuaciones serán utilizadas posteriormente con la finalidad de correlacionar la información procedente del láser con los de textura.

Tabla 3. Ecuaciones y coeficientes de determinación (R^2) obtenidos para cada formulación y parámetro textural

Parámetro	Formulación	Ecuación	R^2
Firmeza	C	$y = 0,0231*t^2 - 0,307*t + 1,1028$	0,968
	Ca	$y = 0,0228*t^2 - 0,3161*t + 1,1699$	0,953
	Gx	$y = 0,0345*t^2 - 0,4559*t + 1,5901$	0,977
Consistencia	C	$y = 126,26*t^2 - 1637,1*t + 5439,7$	0,988
	Ca	$y = 152,68*t^2 - 1982,2*t + 6582,6$	0,967
	Gx	$y = 111,66*t^2 - 1563,7*t + 5604,2$	0,957
Cohesión	C	$y = -4,6143*t^2 + 57,235*t - 178,54$	0,988
	Ca	$y = -4,1316*t^2 + 51,792*t - 163,08$	0,963
	Gx	$y = -4,3075*t^2 + 56,738*t - 187,1$	0,974
Índice de viscosidad	C	$y = -0,0069*t^2 + 0,0837*t - 0,2998$	0,488
	Ca	$y = -0,0064*t^2 + 0,0821*t - 0,3047$	0,705
	Gx	$y = -0,004*t^2 + 0,0565*t - 0,2406$	0,973

5.1.2. Estabilidad fisicoquímica del yogur durante su conservación

Una vez evaluada la etapa de cuajado se procedió a estudiar la estabilidad de los yogures, mantenidos en refrigeración, en función de la presencia de Ca y Ca + Gx, comparados con el C. Para ello se evaluó el pH, la sinéresis y los parámetros de textura mediante análisis instrumental a los días 1, 5 y 7 tras el fin del cuajado.

En la Figura 4 se muestra la evolución del pH para cada formulación durante los días posteriores al cuajado. El seguimiento de la evolución del pH durante el almacenamiento permite obtener información relevante sobre los procesos de fermentación en curso y la actividad metabólica de los microorganismos presentes en la bebida.

En general, se aprecia un descenso del pH respecto al valor final alcanzado tras la fermentación ($\text{pH} \approx 4,5$), atribuible a la denominada acidificación postfermentativa, que representa una alteración no deseada en productos fermentados, y se refiere a la disminución progresiva del pH más allá del umbral óptimo, como consecuencia de la actividad residual de la microbiota durante el periodo de conservación. No obstante, una vez alcanzado este descenso inicial, el pH se mantuvo prácticamente constante a lo largo del periodo de almacenamiento, sin diferencias significativas entre las distintas formulaciones.

Estudios anteriores ya han observado una reducción en el valor del pH de las bebidas de soja fermentadas durante el almacenamiento refrigerado (Ziarno, Zaręba, Ścibisz, & Kozłowska, 2023).

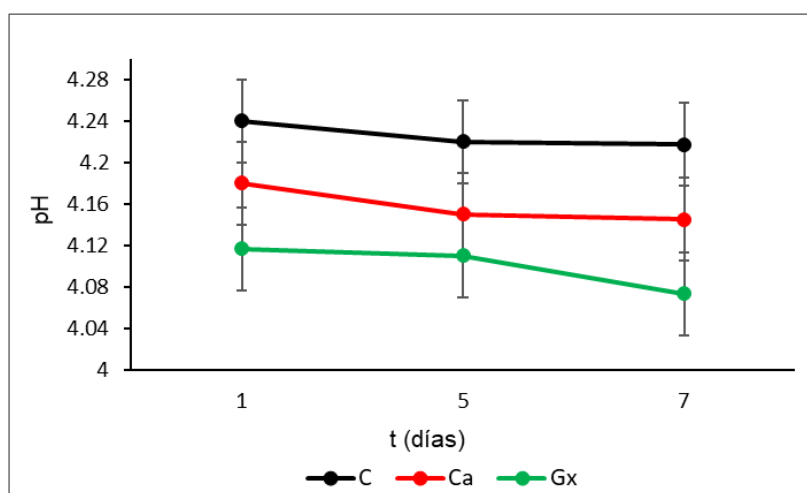


Figura 4. Evolución del pH de las distintas formulaciones de yogur vegetal durante su conservación en refrigeración a los 1, 5 y 7 días.

Si bien la evolución del pH entre los tres tipos de yogures fue mínima, si se observó una evolución diferenciada de la textura entre las formulaciones analizadas, así como con el tiempo de refrigeración (Figura 5). En particular, se observó como la evolución de la muestra control (C) y la enriquecida con calcio (Ca) fue muy similar a lo largo de todo el almacenamiento, si bien la muestra Ca mantuvo una firmeza y consistencia (Fig. 5A y 5B) ligeramente superiores a las de la formulación C, reproduciendo la misma tendencia detectada durante la fase de fermentación en el apartado 5.1.1. Estos resultados, de nuevo indican que los iones Ca^{2+} contribuyen a reforzar la matriz neutralizando parcialmente las cargas negativas de las proteínas y a formar puentes iónicos que densifican la red del gel.

Por su parte, tal y como ya se observó durante la fermentación, la adición de goma xantana (formulación Gx) volvió a destacar por su efecto positivo en la textura, mostrando valores consistentemente superiores de firmeza y consistencia durante todo el periodo de almacenamiento. Este resultado refuerza la hipótesis de que la goma xantana contribuye a estabilizar la red proteica y a contrarrestar el efecto desestabilizante del calcio, permitiendo obtener una matriz más resistente y uniforme durante la conservación en frío.

Asimismo, si se analizan los parámetros de cohesión e índice de viscosidad (Figuras 5C y 5D), se observa una tendencia coherente con los resultados descritos para la firmeza y la consistencia. La formulación con goma xantana (Gx) presentó los valores más altos (negativos) de cohesión, es decir, mayor resistencia a la ruptura del gel, y los valores más elevados de índice de viscosidad, lo que indica una textura más densa y estable. Por el contrario, la formulación control y la fortificada con calcio mostraron una cohesión y un índice de viscosidad menores, reforzando la idea de que la goma xantana actúa como un agente estabilizante eficaz, promoviendo una red más cohesiva y viscosamente más resistente que cuando no se incorpora. Estos resultados coinciden con lo observado por Hematyar et al. (2012), quienes demostraron que la incorporación de goma xantana en yogures incrementa su viscosidad y mejora ligeramente la estabilidad frente a la sinéresis, favoreciendo una red estructural más estable que en muestras sin ella.

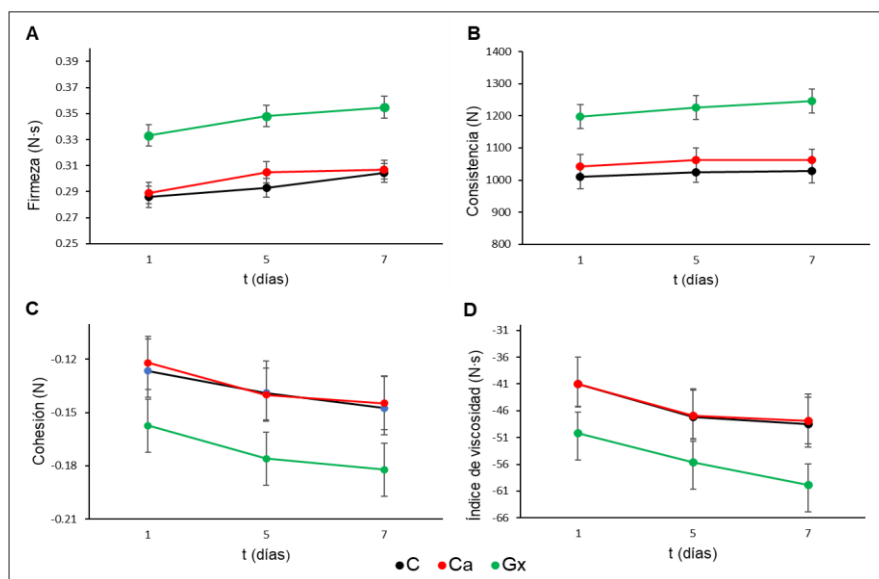


Figura 5. Evolución de los parámetros de textura de las formulaciones C, Ca y Gx durante el almacenamiento refrigerado para 1, 5 y 7 días. (A) Firmeza; (B) Consistencia; (C) Cohesión; (D) Índice de viscosidad.

Si bien los datos de textura mostraron los resultados plasmados en la Figura 5, la apreciación visual de la textural no fue del todo igual a la determinada. Como se puede observar en la Figura 6, en la que se muestra cómo se ven las tres formulaciones de yogur de soja después de 7 días en refrigeración a 4 °C, se puede apreciar como la formulación control tiene una textura más suave, mientras que las muestras enriquecidas con calcio y goma xantana presentan aparentemente una consistencia más firme.

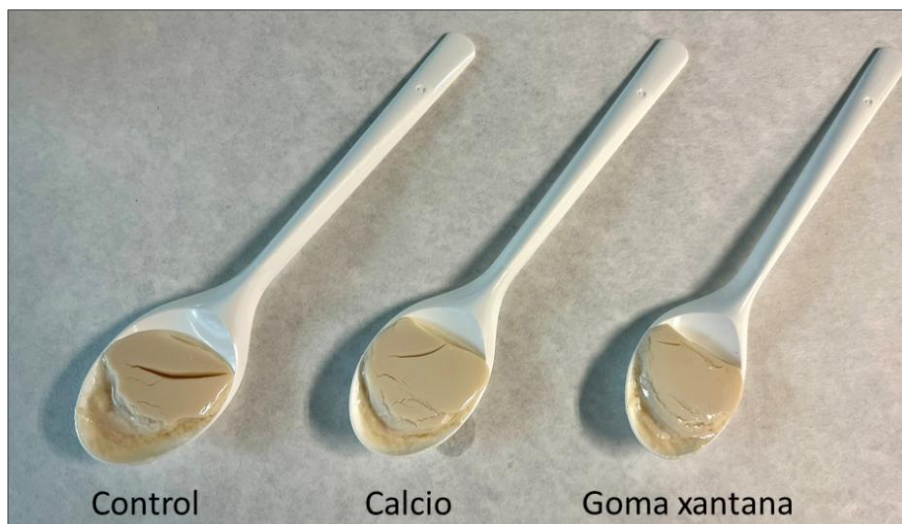


Figura 6. Aspecto visual de las tres formulaciones de yogur de soja tras 7 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C).

Finalmente, en la Figura 7 se representa la sinéresis que mostró cada formulación durante el almacenamiento. Los resultados no mostraron diferencias significativas entre las muestras, ni con el paso del tiempo. La sinéresis observada, representa cuando el gel proteico, al retraerse, pierde su capacidad para retener agua, lo que provoca que el suero aparezca en la superficie del yogur. Este fenómeno, está asociado a varias causas que afectan la estabilidad estructural del producto, como el envejecimiento de la red y cambios en condiciones fisicoquímicas como; variación en la composición de la leche o temperatura de enfriamiento inadecuada (Molina, 2009).

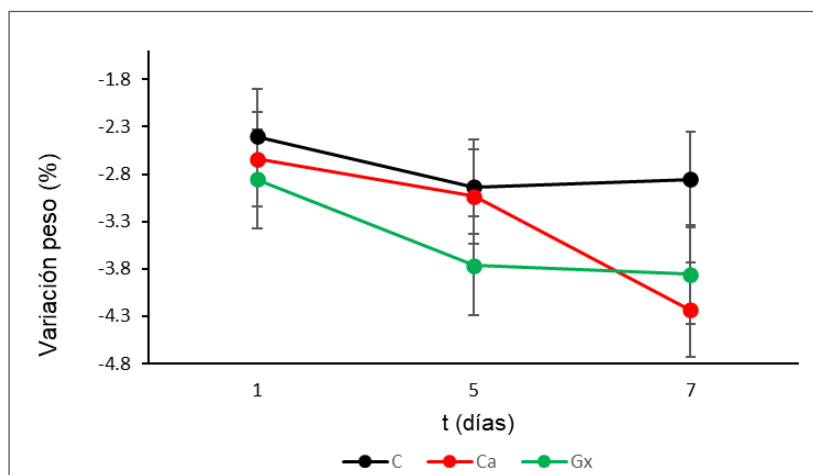


Figura 7. Evolución de la sinéresis, expresada como variación de peso (%), en las distintas formulaciones de yogur de soja durante el almacenamiento en refrigeración (día 1, día 5 y día 7).

En la Figura 8, a modo de ejemplo, se muestra la sinéresis para los tres tipos de yogures y como se aprecia esta fue muy similar en las tres formulaciones, mostrando a simple vista resultados prácticamente idénticos.



Figura 8. Visualización de la sinéresis superficial en las tres formulaciones de yogur de soja tras 7 días de almacenamiento en refrigeración. Las muestras se colocaron ligeramente inclinadas para facilitar la observación del suero liberado.

5.2. Caracterización del cuajado mediante análisis de imagen por dispersión láser

Una vez obtenidas las imágenes y preprocesados los datos, lo primero que se realizó fue una inspección visual de los espectros de intensidad. La Figura 9, a modo de ejemplo, muestra los resultados de intensidad de luz del láser para cada formulación correspondientes al inicio y al final del proceso de fermentación (Fig. 9A, 9B y 9C). Estos gráficos permiten comparar visualmente el comportamiento global de cada muestra, además de observar como la intensidad luminosa disminuye en toda el área de imagen, lo que indica la progresiva formación del gel.

En cada gráfico están marcados con flechas los píxeles de estudio seleccionados para el análisis, facilitando la localización de su posición dentro del espectro.

Como puede observarse, tanto la formulación control (Fig. 9A) como la fortificada con calcio (Fig. 9B) presentaron un comportamiento similar: el píxel central (Pix 200) correspondiente a la zona de emisión directa del láser, sufrió la mayor disminución de intensidad luminosa, mientras que los píxeles más periféricos mostraron una menor variación de su intensidad. En ambas formulaciones, la evolución fue prácticamente idéntica.

En cambio, la formulación con goma xantana (Fig. 9C), mostró un comportamiento diferente a las otras dos muestras. Desde el inicio del proceso fermentativo, la intensidad luminosa fue notablemente menor en comparación con las otras dos formulaciones, lo que se tradujo en una menor variación a lo largo del tiempo. Esta diferencia inicial puede atribuirse a la presencia de goma xantana, que incrementa la viscosidad y la turbidez del sistema desde el principio, dificultando la transmisión de luz a través de la matriz (Asase & Glukhareva, 2023; Rodd, Dunstan, & Boger, 2000).

La menor variación observada en esta formulación concuerda con la capacidad de la goma para formar redes hidrofílicas que dispersan y absorben la radiación, reduciendo el contraste óptico incluso antes de que se produzca la coagulación proteica. En conjunto, la comparación de los espectros confirma que la atenuación de la intensidad del láser está relacionada con la densificación de la red del gel.

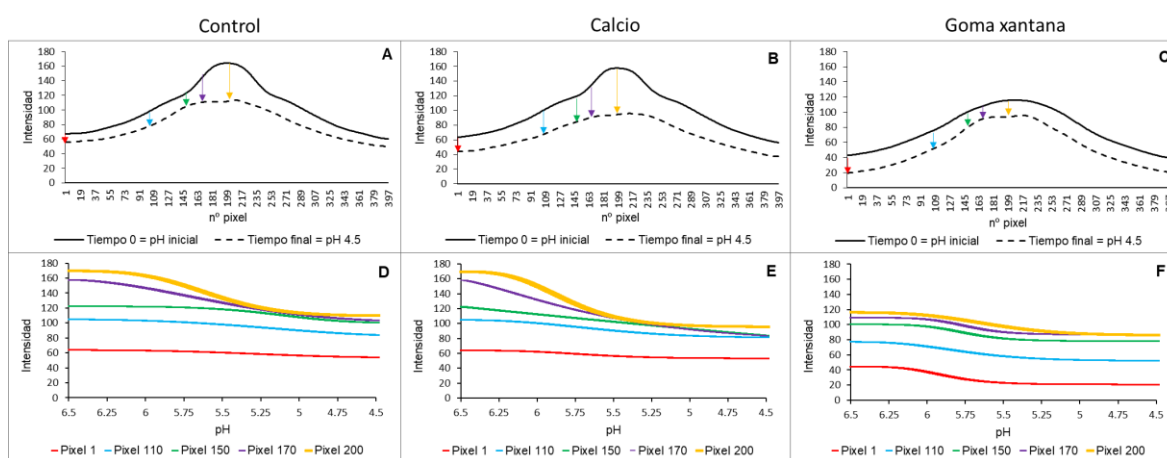


Figura 9. Representación de los datos ópticos obtenidos mediante láser durante la fermentación para las tres formulaciones. (A-C) Espectros completos de intensidad luminosa al inicio y al final del proceso fermentativo para las formulaciones C, Ca y Gx respectivamente; (D-F) Evolución de la intensidad de los cinco píxeles representativos en función del pH para las tres formulaciones.

Por otro lado, en las Figuras 9D, 9E y 9F, se representa la evolución temporal de la intensidad luminosa para cada uno de los cinco píxeles seleccionados, expresada en función del pH. Este análisis permite observar de forma individual el comportamiento de cada píxel representativo en las distintas formulaciones. Tanto la formulación control como la enriquecida con calcio se observa una evolución similar, la intensidad luminosa de todos los píxeles disminuye progresivamente,

siendo los situados en la zona central (Pix 170 y 200) los que mostraron una mayor variación de intensidad.

La formulación con goma xantana, como se ha comentado, presentó un comportamiento claramente diferenciado, especialmente en los píxeles centrales, que partieron con valores de intensidad considerablemente más bajos, tal como ya se evidenciaba en la Figura 9C, efecto atribuible a la presencia de la goma xantana. Del mismo modo, los píxeles periféricos, como el píxel 1, también mostraron intensidades finales notablemente inferiores en comparación con las otras formulaciones.

A modo de ejemplo, en la Figura 10 se muestra la evolución de la imagen captada por la cámara, con los píxeles analizados marcados sobre la línea central. Se representan las imágenes correspondientes al inicio del proceso fermentativo y al final de este (cuando se alcanzó un pH de 4,5) para las muestras control y goma xantana. En ella, se evidencian las diferencias en los puntos de partida entre formulaciones, siendo la de goma xantana notablemente más oscura desde el inicio, lo que sugiere una menor transmisión de la luz debido a su turbidez. En la imagen final, todos los píxeles muestran un oscurecimiento marcado, reflejo del avance en la formación del gel. En la formulación control, aunque también se observa un cambio visible, la atenuación de la intensidad es menos pronunciada.

Mediante esta representación visual (Figura 10) se ha pretendido mostrar la posible relación que existe entre la transmisión del haz de láser, el patrón que genera este en la superficie de la muestra y su relación con las características del medio que está atravesando, permitiendo mostrar de forma clara y visual cómo varió la transmisión de luz en cada formulación durante el proceso de fermentación.

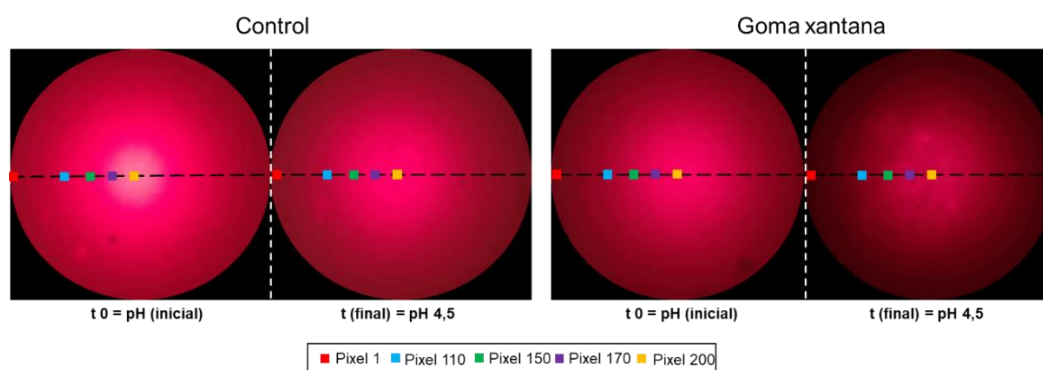


Figura 10. Imágenes captadas por la cámara al inicio y al final (pH=4,5) de la fermentación de yogur de soja en diferentes formulaciones. Se indican los cinco píxeles seleccionados para el análisis de la transmisión de luz láser.

Con la finalidad de evaluar de forma global la evolución del láser de los tres tipos de yogur a lo largo del proceso de cuajado, al espectro completo, una vez preprocesado, se le aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA). Este análisis multivariante se realizó con el fin de reducir la dimensionalidad del conjunto de datos y visualizar agrupaciones espontáneas entre las distintas formulaciones de yogur de soja, detectando así las posibles relaciones entre muestras o patrones.

En la Figura 11 se muestra el valor de la componente 1, la cual explicó el 85,56% de la varianza, a lo largo del tiempo de cuajado (Figura 11A), en función del pH (Figura 11B) y la variación de esta (Figura 11C). Esta componente 1 es la nueva variable que el PCA ha calculado en base a los *loading* (líneas amarillas en la Figura 11B y 11C) y recoge la mayor parte de la variabilidad total de los datos.

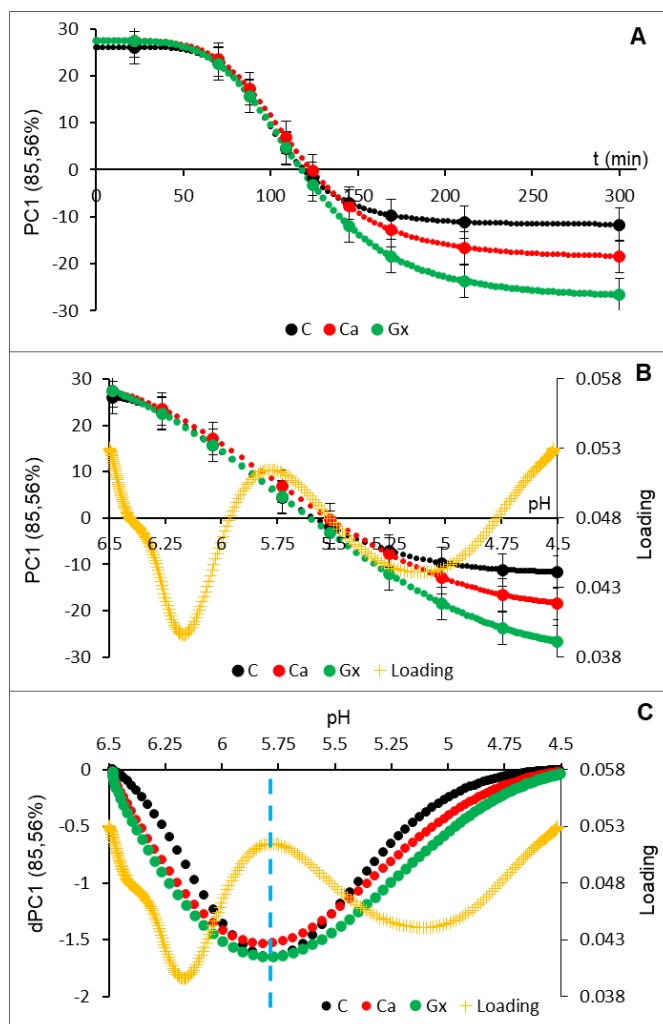


Figura 11. Análisis de Componentes Principales para los datos de láser. Evolución de la componente principal 1 (PC1) durante la fermentación para las tres formulaciones en función del tiempo de cuajado (A) y del pH (B). (C) Primera derivada de la PC1 en función del tiempo de cuajado (A) y del pH (B). (C) Primera derivada de la PC1 en función del pH, marcado en azul el punto de mayor cambio.

Como se observa en la Fig. 11A y 11B, al inicio del proceso fermentativo, las tres formulaciones (C, Ca y Gx) presentan valores similares de la componente principal 1 (PC1), sin que se aprecien diferencias claras. Sin embargo, a partir los 100 minutos, es decir de un pH aproximado de 5,8 – 5,7 comienzan a diferenciarse (punto de máximo valor de los *loading*), lo que coincide con el punto isoeléctrico de algunas de las principales proteínas de la soja, como se explicó en el apartado 5.1.1. En este rango, la β -conglucina presenta un punto isoeléctrico entre pH 5,66 y 6,00, mientras que para la glicina es de aproximadamente $\text{pH} \approx 5$. A partir de ese

momento, se observa una rápida divergencia de la muestra con goma xantana (Gx), seguida de una separación progresiva más adelante entre las formulaciones control (C) y con calcio (Ca), si bien estadísticamente estas diferencias no fueron significativas. Es importante remarcar que con el estudio de PCA no se pretende obtener un modelo de clasificación de las muestras, pues para ello existen otros métodos como el PLSDA (Análisis Discriminante de Mínimos Cuadrados Parciales). Con el análisis PCA solo se pretendió evaluar si los cambios ópticos detectados en función del pH reflejan diferencias en el comportamiento estructural de las formulaciones durante la fermentación y en efecto la PC1 así lo hizo.

La Figura 11C muestra de forma más evidente el cambio en la PC1 mostrando la primera derivada de esta con respecto al pH. Como se observa, al igual que ocurrió con la primera derivada del pH con el tiempo (Figura 2B) se evidenció un punto de inflexión alrededor de $\text{pH} \approx 5,8$, marcado en azul, correspondiente al momento de mayor cambio en la estructura del sistema (mayor peso de los *loading*). Este análisis permitió correlacionar la evolución de la señal láser con el descenso del pH durante la fermentación, en los que ambos evidencian cómo los cambios ópticos reflejan transformaciones estructurales en las diferentes formulaciones.

5.3. Evaluación láser del yogur durante su conservación

Durante el almacenamiento refrigerado, las tres formulaciones de yogur de soja fueron analizadas mediante imágenes obtenidas por dispersión láser en los días uno, cinco y siete. A partir de estas imágenes se aplicó un análisis PCA con el objetivo de reducir la dimensionalidad de los datos y facilitar su interpretación. Tal como se muestra en la Figura 12, la PC1 explicó el 92,93 % de la variabilidad total, es decir, que recoge la mayor parte de la información relevante sobre los cambios observados a lo largo del almacenamiento en refrigerado.

Al comparar las tres formulaciones, se observa que cada una presentó una estructura interna diferente, lo que afecta el modo en que la luz se dispersa a través de la muestra. El yogur control mostró un patrón de dispersión láser más elevado, seguido por la formulación con calcio, que presentó un comportamiento intermedio. En cambio, la muestra con goma xantana mostró desde el inicio valores mucho más negativos y estables a lo largo del tiempo.

Estos resultados son coherentes con lo observado en el apartado 5.1.2., donde se evaluó la estabilidad fisicoquímica durante el almacenamiento. Los valores más elevados de la PC1 en las formulaciones control y calcio reflejan una mayor intensidad de luz dispersada, lo que sugiere una estructura interna menos densa y, por tanto, una textura más débil o menos firme. Por el contrario, los valores notablemente más inferiores de la PC1 en la muestra con goma xantana indican una menor dispersión de la luz, asociada a una matriz más compacta y cohesiva, como se evidenció también en la Figura 5.

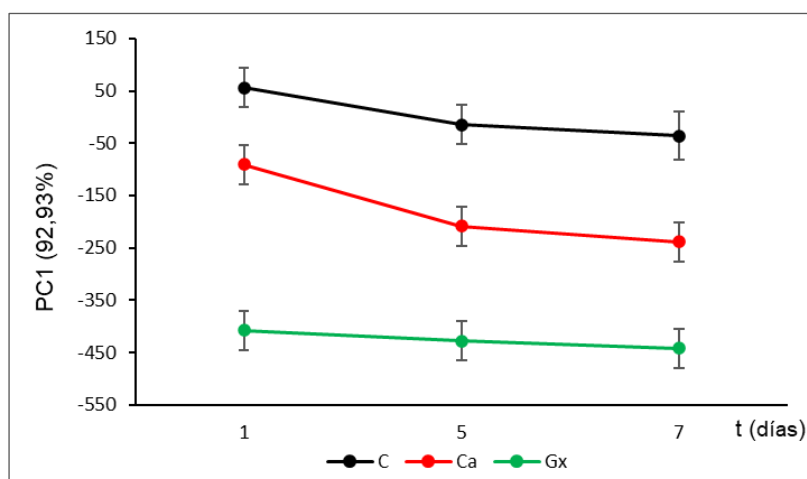


Figura 12. Análisis de componentes principales (PCA) de las imágenes por dispersión láser de las tres formulaciones de yogur de soja durante el almacenamiento (días 1, 5 y 7).

5.4. Correlación entre los datos procedentes del análisis fisicoquímico y del láser

Una vez evaluados los datos tanto fisicoquímicos como procedentes de la técnica láser, y observándose cierta similitud en el comportamiento de ambos, se procedió a evaluar la posible correlación entre ambos, y en su caso buscar modelos que pudiesen predecir las características fisicoquímicas a partir de la información obtenida por láser. Para ello se aplicó el análisis SVM, siendo las variables ópticas obtenidas a partir de las imágenes láser la matriz X y los parámetros de textura medidos mediante extrusión la matriz Y. Con el fin de facilitar la aplicación del modelo, este se calculó considerando la información tanto de láser como de textura cada 25 minutos hasta los 300 minutos (0, 25, 50, 75, ..., 300 min). Para ello se extrajo la información laser a estos tiempos (matriz X) y a partir de los modelos de textura calculados mediante las ecuaciones de la Tabla 3, los de textura (matriz Y).

En la Figura 13 se muestran los diagramas de paridad para (A) firmeza, (B) consistencia e (C) índice de viscosidad. El eje X representa los valores observados experimentalmente, mientras que el eje Y recoge los valores predichos por el modelo SVM. La línea discontinua ($X=Y$) indica una predicción perfecta. Los diagramas integran tanto las muestras evaluadas durante el cuajado (símbolos con relleno azul en la Figura 13) como las analizadas durante el almacenamiento en refrigeración (símbolos sin relleno azul en la Figura 13)

La estrecha alineación de los puntos a lo largo de esta línea discontinua confirma la alta capacidad predictiva del modelo y, por tanto, la existencia de una correlación directa entre la evolución de la señal láser y el comportamiento mecánico del yogur.

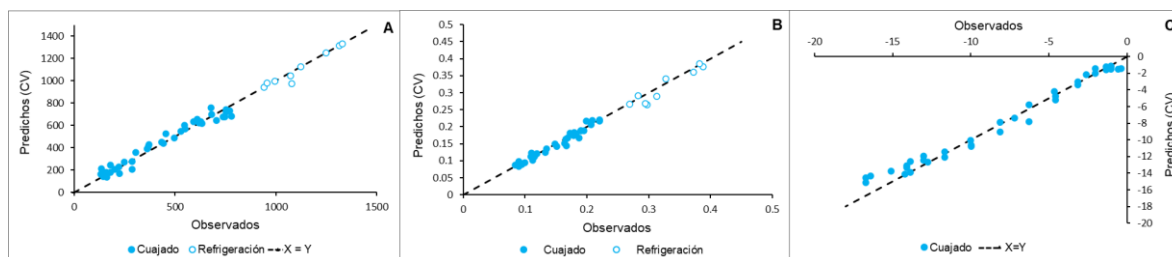


Figura 13. Diagramas de paridad del modelo SVM obtenido para (A) firmeza, (B) consistencia e (C) índice de viscosidad, a partir de las variables ópticas registradas mediante imágenes láser.

En la tabla 4 se resumen los coeficientes de determinación y errores de validación cruzada que avalan lo anterior.

Tabla 4. Parámetros estadísticos del modelo SVM para firmeza, consistencia y cohesión, en condiciones de cuajado y tras almacenamiento en refrigeración.

Fase	Variable	R ² C	R ² CV	RMSEC	RMSECV
Cuajado	Firmeza	0,99	0,94	18,1	51,3
	Consistencia	0,99	0,93	0,004	0,010
	Índice de viscosidad	0,99	0,85	0,48	1,27
Cuajado + refrigeración	Firmeza	0,93	0,98	25,2	89
	Consistencia	0,99	0,93	0,007	0,020

Los valores R²CV superiores a 0,93 para firmeza y consistencia, para ambas fases del proceso, y los errores de validación cruzada (RMSECV) relativamente bajos, demuestran que el modelo es robusto. Si bien el índice de viscosidad presentó un ajuste menor en validación (R²CV= 0,85), los resultados globales confirman que, a partir de las imágenes láser, es posible estimar con fiabilidad la firmeza y consistencia y en menor medida el índice de viscosidad de la matriz, lo que convierte a esta técnica óptica en una herramienta no destructiva eficaz para el seguimiento de la calidad durante la fermentación y el almacenamiento del yogur.

6. CONCLUSIONES

El estudio desarrollado permite concluir que el análisis de imagen por dispersión láser es una herramienta eficaz para caracterizar de forma no destructiva y continua la evolución textural del yogur de soja, tanto durante el proceso de fermentación como a lo largo del almacenamiento. Los datos obtenidos mediante esta técnica mostraron una elevada correlación con los valores obtenidos a través del análisis instrumental tradicional de textura, lo que permite predecir con fiabilidad propiedades como la firmeza y la consistencia sin necesidad de destruir las muestras. En cuanto a las formulaciones, la adición de cloruro cálcico generó una ligera mejora estructural, mientras que la combinación de cloruro cálcico y goma xantana dio lugar a una matriz significativamente más compacta y estable. Estas diferencias entre formulaciones se reflejaron de forma coherente tanto en los resultados del texturómetro como en los datos ópticos obtenidos mediante dispersión láser. En conjunto, los resultados respaldan la validez de esta técnica óptica como método alternativo para el seguimiento textural de productos fermentados de origen vegetal, con un alto potencial de aplicación en la industria alimentaria como herramienta de control de calidad no invasivo y en tiempo real, si bien nuevos procesados de las imágenes podrían incrementar la información obtenidas en ellas.

7. BIBLIOGRAFÍA

Asase, R. V., & Glukhareva, T. V. (2024). Production and application of xanthan gum—prospects in the dairy and plant-based milk food industry: a review. In *Food Science and Biotechnology* (Vol. 33, Issue 4). <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01442-7>

Chandan, R. C., Gandhi, A., & Shah, N. P. (2017). Yogurt: Historical background, health benefits, and global trade. In *Yogurt in Health and Disease Prevention*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805134-4.00001-8>

Clegg, M. E., Tarrado Ribes, A., Reynolds, R., Kliem, K., & Stergiadis, S. (2021). A comparative assessment of the nutritional composition of dairy and plant-based dairy alternatives available for sale in the UK and the implications for consumers' dietary intakes. *Food Research International*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110586>

El-Sayed, E. M., Abd El-Gawad, I. A., Murad, H. A., & Salah, S. H. (2002). Utilization of laboratory-produced xanthan gum in the manufacture of yogurt and soy yogurt. *European Food Research and Technology*, 215(4). <https://doi.org/10.1007/s00217-002-0551-9>

Geng, Y., Du, X., Jia, R., Zhu, Y., Lu, Y., Guan, X., Hu, Y., Zhu, X., & Zhang, M. (2024). Research Progress on Tofu Coagulants and Their Coagulation Mechanisms. *Foods (Basel, Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/foods13213475>

González, A. D., Frostell, B., & Carlsson-Kanyama, A. (2011). Protein efficiency per unit energy and per unit greenhouse gas emissions: Potential contribution of diet choices to climate change mitigation. *Food Policy*, 36(5). <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2011.07.003>

Guo, J., & Yang, X. Q. (2015). Texture modification of soy-based products. In *Modifying Food Texture: Novel Ingredients and Processing Techniques*. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-333-1.00011-5>

Harper, A. R., Dobson, R. C. J., Morris, V. K., & Moggré, G. J. (2022). Fermentation of plant-based dairy alternatives by lactic acid bacteria. In *Microbial Biotechnology* (Vol. 15, Issue 5). <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14008>

Hematyar, N., Samarin, A. M., Poorazarang, H., & Elhamirad, A. H. (2012). Effect of gums on yogurt characteristics. *World Applied Sciences Journal*, 20(5). <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.20.05.2353>

Hurler, J., Engesland, A., Poorahmary Kermany, B., & Škalko-Basnet, N. (2012). Improved texture analysis for hydrogel characterization: Gel cohesiveness, adhesiveness, and hardness. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(1). <https://doi.org/10.1002/app.35414>

- Islam, N., Shafiee, M., & Vatanparast, H. (2021). Trends in the consumption of conventional dairy milk and plant-based beverages and their contribution to nutrient intake among Canadians. *Journal of Human Nutrition and Dietetics*, 34(6). <https://doi.org/10.1111/jhn.12910>
- Jaeger, S. R., Dupas de Matos, A., Frempomaa Oduro, A., & Hort, J. (2024). Sensory characteristics of plant-based milk alternatives: Product characterisation by consumers and drivers of liking. *Food Research International*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114093>
- Jaeger, S. R., & Giacalone, D. (2021). Barriers to consumption of plant-based beverages: A comparison of product users and non-users on emotional, conceptual, situational, conative and psychographic variables. *Food Research International*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110363>
- Kim, H. J., & Han, M. J. (2019). The fermentation characteristics of soy yogurt with different content of d-allulose and sucrose fermented by lactic acid bacteria from Kimchi. *Food Science and Biotechnology*, 28(4). <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00560-5>
- Lee, W. J., & Lucey, J. A. (2010). Formation and physical properties of yogurt. In *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* (Vol. 23, Issue 9). <https://doi.org/10.5713/ajas.2010.r.05>
- Lucey, J. A., & Singh, H. (1997). Formation and physical properties of acid milk gels: A review. In *Food Research International* (Vol. 30, Issue 7). [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(98\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(98)00015-5)
- Mäkinen, O. E., Wanhalinna, V., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2016). Foods for Special Dietary Needs: Non-dairy Plant-based Milk Substitutes and Fermented Dairy-type Products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(3). <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.761950>
- Martí Sala, A. (2021). *Caracterización de la textura de muestras de plátano mediante el análisis no destructivo basado en el estudio de patrones láser*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/171015>
- Mazurkevičiūtė, A., Matulytė, I., Ivaškienė, M., & Žilijus, M. (2022). Assessment of Physical, Mechanical, Biopharmaceutical Properties of Emulgels and Bigel Containing Ciclopirox Olamine. *Polymers*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/polym14142783>
- McCarthy, K. S., Parker, M., Ameeraly, A., Drake, S. L., & Drake, M. A. (2017). Drivers of choice for fluid milk versus plant-based alternatives: What are consumer perceptions of fluid milk? *Journal of Dairy Science*, 100(8). <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12519>
- Ministerio de la Presidencia. (2014). Real Decreto 271/2014 , de 11 de abril , por el que se aprueba la Norma de Calidad para el yogur o yoghurt. *Boletín Oficial Del Estado (BOE)*, 102.

- Molina Chew, I. S. (2009). *Comparación de tres estabilizantes comerciales utilizados en la elaboración de yogurt de leche descremada de vaca*. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/3261>
- Mulalapele, L. T., & Xi, J. (2021). Detection and inactivation of allergens in soybeans: A brief review of recent research advances. In *Grain and Oil Science and Technology* (Vol. 4, Issue 4). <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2021.11.001>
- Nakatani, A., Li, X., Miyamoto, J., Igarashi, M., Watanabe, H., Sutou, A., Watanabe, K., Motoyama, T., Tachibana, N., Kohno, M., Inoue, H., & Kimura, I. (2018). Dietary mung bean protein reduces high-fat diet-induced weight gain by modulating host bile acid metabolism in a gut microbiota-dependent manner. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 501(4). <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2018.05.090>
- Penna, A. L. B., Subbarao-Gurram, & Barbosa-Cánovas, G. v. (2007). High hydrostatic pressure processing on microstructure of probiotic low-fat yogurt. *Food Research International*, 40(4). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.01.001>
- Qin, P., Wang, T., & Luo, Y. (2022). A review on plant-based proteins from soybean: Health benefits and soy product development. *Journal of Agriculture and Food Research*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100265>
- Rodd, A. B., Dunstan, D. E., & Boger, D. v. (2000). Characterization of xanthan gum solutions using dynamic light scattering and rheology. *Carbohydrate Polymers*, 42(2). [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(99\)00156-3](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(99)00156-3)
- Ruíz-Henestrosa, V. P., Sánchez, C. C., Pedroche, J. J., Millán, F., & Rodríguez Patino, J. M. (2009). Improving the functional properties of soy glycinin by enzymatic treatment. Adsorption and foaming characteristics. *Food Hydrocolloids*, 23(2). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.03.011>
- Saint-Eve, A., Lévy, C., le Moigne, M., Ducruet, V., & Souchon, I. (2008). Quality changes in yogurt during storage in different packaging materials. *Food Chemistry*, 110(2). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.01.070>
- Sethi, S., Tyagi, S. K., & Anurag, R. K. (2016). Plant-based milk alternatives an emerging segment of functional beverages: a review. In *Journal of Food Science and Technology* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2328-3>
- Sfakianakis, P., Topakas, E., & Tzia, C. (2015). Comparative Study on High-Intensity Ultrasound and Pressure Milk Homogenization: Effect on the Kinetics of Yogurt Fermentation Process. *Food and Bioprocess Technology*, 8(3). <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1412-9>
- Siche Jara, R., Bances Majuan, K. D. M., Cachay Santillán, K. M., & Castillo Martinez, W. E. (2020). *Sustitución de Goma Xantana (Xanthomonas campestris) por gomas vegetales en yogurt estilo griego: propiedades reológicas y sensoriales*. <https://doi.org/10.18687/laccei2020.1.1.196>

Silva, A. R. A., Silva, M. M. N., & Ribeiro, B. D. (2020). Health issues and technological aspects of plant-based alternative milk. In *Food Research International* (Vol. 131). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108972>

Trecet Pizarro, R. (2018). *Aplicación de métodos estadísticos multivariantes para la evaluación de la calidad en jamones, por medio de estructuras de datos N-dimensionales*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/113879>

Verdú, S., Barat, J. M., & Grau, R. (2019). Non destructive monitoring of the yoghurt fermentation phase by an image analysis of laser-diffraction patterns: Characterization of cow's, goat's and sheep's milk. *Food Chemistry*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.091>

Vicens Mira, V. P. (2019). *Monitorización de la etapa de cuajado de queso mediante la técnica no destructiva de imagen basada en el análisis de patrones láser*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/127227>

Wang, X., Kong, X., Zhang, C., Hua, Y., Chen, Y., & Li, X. (2023). Comparison of physicochemical properties and volatile flavor compounds of plant-based yoghurt and dairy yoghurt. *Food Research International*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112375>

Yazici, F., Alvarez, V. B., & Hansen, P. M. T. (1997). Fermentation and properties of calcium-fortified soy milk yogurt. *Journal of Food Science*, 62(3). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb04406.x>

Ziarno, M., Zaręba, D., Ścibisz, I., & Kozłowska, M. (2023). Comprehensive studies on the stability of yogurt-type fermented soy beverages during refrigerated storage using dairy starter cultures. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1230025>