

Interfacial properties in multiphase food systems: scientific trends in formation, structure and functionality

Propiedades interfaciales en sistemas alimentarios multifásicos: tendencias científicas en formación, estructura y funcionalidad

López Fuertes Yesika ^{1*}, Roa Acosta Diego Fernando ¹, Solanilla Duque José Fernando ¹, Bravo Gomez Jesus Eduardo ¹, Nieto Calvache Jhon Edinson ²

Recibido: 16/04/2024

Aceptado: fecha25/06/2024

Fecha de Publicación: 27/11/2024



Derechos de autor: © 2024

1 Universidad del Cauca; yesikalopez@unicauca.edu.co

1 Universidad del Cauca; drosa@unicauca.edu.co

1 Universidad del Cauca; jsolanilla@unicauca.edu.co

1 Universidad del Cauca; jebravo@unicauca.edu.co

2 Universidad de los Llanos 2; jnieto@unillanos.edu.co

* Autor de correspondencia: yesikalopez@unicauca.edu.co

Resumen: Para analizar las propiedades interfaciales de las harinas en el desarrollo de productos instantáneos, se realizó un estudio bibliométrico de 633 artículos (1983-presente) utilizando Scopus. Con la herramienta Science Mapping Analysis (SciMAT), se generaron estructuras de evolución temática, diagramas estratégicos y redes temáticas, proporcionando una visión bibliométrica y visual del campo. El estudio identificó grupos estratégicos de investigación y tendencias clave, como el creciente enfoque en la evaluación de proteínas en las últimas décadas. Las proteínas de las harinas son fundamentales para estabilizar las interfaces, influidas por factores como el pH, la temperatura y las interacciones con otros componentes alimentarios. Entre diversos métodos la reología dilatacional destaca como un método crucial para analizar propiedades interfaciales, al medir módulos de expansión que reflejan comportamientos elásticos y viscosos. Además, herramientas avanzadas como analizadores de tamaño de micropartículas, reómetros interfaciales y espectroscopia de adsorción proporcionan información precisa sobre topografía de interfaz e interacciones moleculares. Los modelos computacionales predicen comportamientos complejos, contribuyendo a optimizar formulaciones que mejoren propiedades viscoelásticas, funcionalidad y calidad sensorial. Este enfoque, centrado en la reología interfacial y las interacciones moleculares, es clave para innovar en el desarrollo de productos instantáneos estables, funcionales y sensorialmente atractivos.

Palabras clave: Propiedades interfaciales; proteínas; emulsiones; interacciones intermoleculares; sistemas multifásicos.

Abstract: To examine the interfacial properties of flours in the development of instant products, a bibliometric study of 633 articles (1983–present) was conducted using the Scopus database. The Science Mapping Analysis Tool (SciMAT) was employed to generate thematic evolution structures, strategic diagrams, and thematic networks, offering both bibliometric and visual insights into the field. The study identified strategic research clusters and key trends, including a growing focus on protein assessment in recent decades. Proteins in flours are essential for stabilizing interfaces, with their behavior influenced by factors such as pH, temperature, and interactions with other food components. Among the various methods available, dilatational rheology emerges as a critical approach for analyzing interfacial properties, as it measures expansion moduli that reflect both elastic and viscous behaviors. Additionally, advanced tools like microparticle size analyzers, interfacial rheometers, and adsorption spectroscopy provide precise insights into interface topography and molecular interactions. Computational models further enhance understanding by predicting complex interfacial behaviors, supporting the optimization of formulations to improve viscoelastic properties, functionality, and sensory quality. This integrative approach, emphasizing interfacial rheology and molecular interactions, is fundamental to driving innovation in the development of stable, functional, and sensorially appealing instant products.

Keywords: Interfacial properties; proteins; emulsions; intermolecular interactions; multiphase systems.

DOI: <https://doi.org/10.57173/ritc.v1n18a6>

1. Introducción

Los recientes avances en el estudio de las propiedades interfaciales han conducido a su aplicación en diversas industrias [1], como la alimentaria, la del cuidado personal, la cosmética, la de los detergentes y la farmacéutica, así como en procesos funcionales como la encapsulación y la liberación de bioactivos [2]. En la industria alimentaria, el análisis de las propiedades interfaciales en harinas es crucial para el desarrollo de productos instantáneos, ya que su estabilidad y funcionalidad dependen en gran medida de estas características. Esto pone de relieve el papel fundamental de las propiedades interfaciales en el diseño y la formulación de alimentos que cumplan las normas de calidad y rendimiento.

Los sistemas alimentarios multifásicos, como las espumas y las emulsiones, representan sistemas termodinámicamente metaestables que tienden a separarse en sus componentes individuales con el tiempo [3]. Este comportamiento se atribuye a su compleja estructura y a la inestabilidad derivada de la elevada energía interfacial [4], influida por diversas variables, en particular la solubilidad de las proteínas, el pH, la estructura de las proteínas y la presencia de tensioactivos [2].

Las propiedades interfaciales desempeñan un papel crucial en la producción, la estabilidad y las características sensoriales de los sistemas alimentarios multifásicos [5]. Estas propiedades influyen en el comportamiento de los alimentos durante su procesamiento y almacenamiento, así como en sus atributos organolépticos. Entender la naturaleza reológica de las interacciones intermoleculares es esencial para comprender cómo interactúan los distintos componentes en la formación de los sistemas, siendo vital para optimizar los productos alimentarios, asegurando las características deseables en estabilidad, textura y vida útil [6].

En este contexto, la investigación se ha centrado en mejorar la estabilidad prolongada y las propiedades de los productos alimentarios. Los indicadores bibliométricos han demostrado ser valiosos para analizar la producción científica y tecnológica en este campo [7], permitiendo comparaciones entre países, instituciones y revistas, y ofreciendo una visión global de los avances mundiales [8]. Para abordar los estudios sobre la importancia de las propiedades interfaciales en cuanto a su formación, estructura y funcionalidad, se realizó un estudio bibliométrico que implicó el diseño de una estrategia de búsqueda en la base de datos Scopus, reconocida por sus artículos científicos de alta calidad [9]. Se utilizó la herramienta Science Mapping Analysis Tool (SciMAT) v1.1.04 para procesar los datos y crear un mapa bibliométrico que reflejara la evolución temática a lo largo del tiempo. Este enfoque facilita un análisis detallado de las publicaciones científicas, categorizando los temas clave relacionados con las propiedades interfaciales de los alimentos. El objetivo es mejorar la comprensión de las tendencias actuales y desarrollar estrategias para estabilizar eficazmente los sistemas alimentarios multifásicos. Dada la naturaleza dinámica del campo, una revisión exhaustiva de los artículos desde 1998 hasta la actualidad es esencial para sintetizar la información sobre las propiedades interfaciales estables, identificar las tendencias emergentes y explorar las aplicaciones futuras.

Este enfoque permite realizar un análisis exhaustivo de la literatura científica, facilitando la categorización y evaluación de cuestiones clave relacionadas con las propiedades interfaciales de los alimentos. El objetivo de esta revisión fue recopilar información clave sobre el desarrollo de productos alimentarios multifásicos para la producción de alimentos instantáneos derivados de harinas. Se destaca la importancia de las propiedades interfaciales y las cinéticas de adsorción de proteínas, carbohidratos y lípidos, factores fundamentales para identificar la funcionalidad, estabilidad y el comportamiento reológico dilatacional en estos sistemas complejos. Este conocimiento resulta prioritario para optimizar las formulaciones y comprender los mecanismos de estabilidad, lo que permite establecer estrategias innovadoras dirigidas al desarrollo de productos y sus futuras aplicaciones en la industria alimentaria.

2. Materiales y métodos

Para el desarrollo del estudio de la vigilancia tecnológica se realizó la búsqueda de las publicaciones relacionadas con las propiedades interfaciales de los alimentos, a través de herramientas de bibliometría y cienciometría y se empleó la metodología de [10] con algunas modificaciones. Los pasos seguidos en la vigilancia tecnológica se llevaron a cabo en 3 fases y se describen a continuación:

2.1. Estrategia de búsqueda - fase 1

Esta fase comprende el diseño de la estrategia de búsqueda o ecuación estructural empleada en la base de datos Scopus que cuenta con un volumen de documentos, calidad científica y depuración [9]. La ecuación consiste en palabras clave relacionadas con las propiedades interfaciales de alimentos instantáneos. Por lo tanto, para el desarrollo del presente estudio se utilizó la ecuación -PROTEIN and "INSTAND FOODS" or RHEOLOGY and "INTERFACIAL PROPERTIES" and EMULSION-, se recuperaron 633 resultados de documentos con cobertura temporal limitada (1988-2023). No hubo restricción en la tipología documental, lo que permitió la inclusión de artículos de congresos y otras fuentes como libros o capítulos de libros que pueden ser de interés en el análisis (base de datos del corpus). Los corpus se analizaron en SciMAT v1.1.04.

2.2. Bibliometría y Paisajes científicos - fase 2

La bibliometría es una ciencia del análisis cuantitativo de la información, analiza objetiva y cuantitativamente el impacto de las investigaciones académicas [11], siendo una de las técnicas de evaluación y medición de indicadores de la situación y evolución de las tendencias, el impacto y la visibilidad de las publicaciones a partir de métodos matemáticos y estadísticos [12].

La minería de textos con el método de análisis bibliométrico permite un análisis estadístico de diversos datos sobre publicaciones científicas, incluido su país, autor (es), cooperación entre autores, citas, referencias, instituciones, fecha de publicación y plantea el aspecto general de una determinada disciplina a partir de los resultados estadísticos obtenidos en este sentido el propósito del mapeo científico es demostrar los aspectos estructurales y dinámicos de una investigación científica [13].

2.3. Cienciometría - fase 3

En este estudio de vigilancia tecnológica se determinaron indicadores bibliométricos como: número de documentos publicados, índice h con el fin de medir el impacto tanto de los temas detectados como de las áreas temáticas, documentos y revistas más citadas y para el mapeo científico se realizó mediante el uso de la herramienta SciMAT v1.1.04., fijando cuatro diagramas de salida: A. Diagrama estratégico, este es un espacio bidimensional construido por la centralidad y densidad, B. Red temática, son varias palabras claves interconectadas, donde el tamaño del círculo es proporcional al número de documentos correspondiente a cada palabra clave y el grosor de la línea es proporcional al índice de equivalencia, C. Mapa de evolución temática, indica los temas en desarrollo de un periodo al siguiente periodo y D. Gráfico de fracciones superpuestas, este gráfico muestra la evolución de las palabras clave, entradas y salidas de términos de un periodo al otro.

De acuerdo con las recomendaciones de [14] se construyeron gráficos longitudinales y estratégicos a partir de la coocurrencia de palabras clave para cada periodo. Se emplearon índices de equivalencia como técnica de normalización para reducir los errores de conteo de palabras clave que frecuentemente coexisten en los documentos. Para generar la estructura de la red temática, se eligió un algoritmo de centrado único que agrupaba los datos en diferentes clases, permitiendo visualizar las conexiones entre el clúster central y sus subtemas para cada periodo [14].

3. Resultados

Tras ejecutar el software de cartografía científica SciMAT 1.1.04 con la configuración especificada y avanzar en la depuración de palabras y sus correlaciones a lo largo de cinco periodos -Periodo 1 (1983-2000), Periodo 2 (2001-2010), Periodo 3 (2011-2015), Periodo 4 (2016-2020) y Periodo 5 (2021-2023)- se obtuvo un total de 633 documentos, según los parámetros definidos en la ecuación inicial.

Según [15] el mapa superpuesto (Figura 1) sirve para ilustrar los cambios en los temas y la estabilidad de los campos de investigación mediante una representación visual del flujo de datos. Los círculos en el mapa denotan diferentes periodos de tiempo, y la cifra dentro de cada círculo representa el número de temas durante ese periodo específico. Las flechas horizontales que conectan dos círculos indican la continuidad entre los dos periodos, con el número de la flecha indicando los temas compartidos y el valor entre paréntesis representando el índice de estabilidad, que mide el solapamiento entre los dos periodos. La flecha superior de entrada significa el número de temas nuevos introducidos en un periodo determinado, mientras que la flecha superior de salida representa los temas presentados en ese periodo pero no en el siguiente.

En la Figura 1 se presentan las medidas de estabilidad de los cinco periodos consecutivos, junto con los resultados longitudinales de todos los documentos analizados a lo largo de esos periodos. En particular, en los últimos años se observa una mayoría significativa de documentos con índices de participación en las citas (índice h). Las palabras clave desempeñan un papel crucial a la hora de distinguir y destacar el objeto de estudio. En este caso, se observa un notable aumento del 145% en el número de palabras clave, pasando de 59 a 86, del primer al último periodo. En la Figura 1, los resultados muestran las medidas de estabilidad para los cinco periodos consecutivos. En el primer periodo, había 59 palabras clave asociadas, y las 59 palabras se compartían con el segundo periodo, lo que demuestra un índice de similitud de 0,66. Además, surgieron 30 palabras nuevas en el segundo periodo. Además, en el periodo dos surgieron 30 palabras nuevas, lo que dio como resultado un total de 89 palabras agrupadas. En el periodo tres, se distribuyeron 79 palabras, y el índice de similitud en el periodo dos fue de 0,8. En el periodo 3, se asociaron un total de 89 palabras, con 82 palabras compartidas con el periodo 4 y un índice de similitud de 0,81. En el cuarto periodo, se encontraron asociadas 94 palabras clave, y 77 palabras fueron compartidas con el periodo cinco, lo que indica un índice de similitud de 0,75. Por último, en el periodo 5 se agruparon 86 palabras.

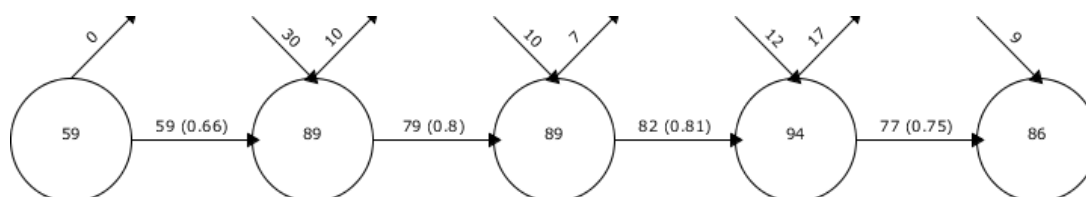


Figura 1. Mapa superpuesto de Índice de estabilidad

En el mapa bibliométrico de evolución temática (Figura 2), se observa la progresión de los estudios realizados sobre productos instantáneos en los últimos 40 años, divididos en cinco periodos distintos de izquierda a derecha: Periodo 1 (1983-2000), Periodo 2 (2001-2010), Periodo 3 (2011-2015), Periodo 4 (2016-2020) y Periodo 5 (2021-2023).

Los datos utilizados para este estudio se extrajeron de las bases de datos Scopus, se descargaron en formato .RIS y la búsqueda se realizó en febrero de 2023. Los datos descargados fueron procesados en SciMAT v1.1.04. Se corrigieron los acentos especiales en los nombres de los autores y se eliminaron los documentos duplicados con el mismo título y autores. Se puede acceder a los datos cargados a través de la opción «Base de

conocimientos → Documentos → Gestor de documentos». Inicialmente se identificaron 633 documentos. Mediante la herramienta informática Gestor de documentos, se eliminaron los documentos duplicados con el mismo título, siendo el criterio de eliminación el menor número de citas.

Posteriormente, se empleó SciMAT v1.1.04. con el comando 'Group set → Word → Find similar word by plurals (automatic)' para limitar el número de palabras con significados similares entre plurales y singulares. Por último, se utilizó la herramienta de software 'Knowledge Base → Words → Word Manager' para unir palabras o acrónimos con el mismo significado, como 'Air-water-interface' y 'Air/water-interface'. Los datos procesados se almacenaron en SciMAT v1.1.04. Para cargar la base de datos, se instaló SciMAT v1.1.04. y se ejecutó el comando 'Archivo → Abrir proyecto' para buscar el nombre del archivo y cargar el análisis realizado.

Tras la consolidación con SciMAT v1.1.04., incluidos los pasos de procesamiento para descartar duplicados y tratar palabras similares, se realizó un análisis de crecimiento para observar las tendencias de publicación anuales. Posteriormente, se empleó la herramienta de análisis SciMAT para establecer conexiones entre diferentes periodos y clusters, centrándose en los temas más relevantes a lo largo de los años.

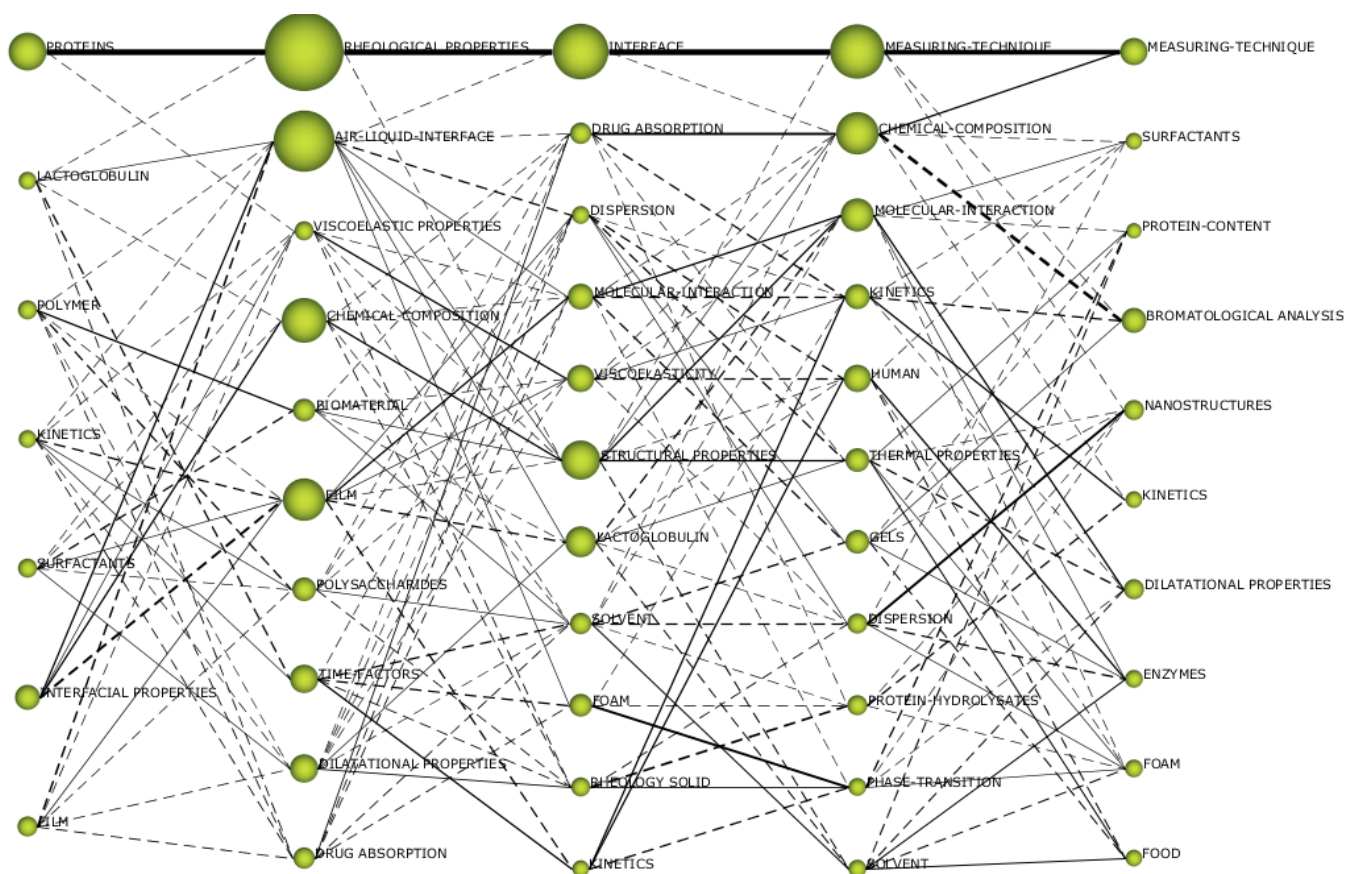


Figura 2. Mapa bibliométrico de evolución temática

Los datos, derivados de documentos encontrados en Scopus, fueron sometidos a una clasificación por SciMAT v1.1.04. basada en tres aspectos fundamentales: periodos de tiempo (Periodo 1: 1983-2000, Periodo 2: 2001-2010, Periodo 3: 2011-2015, Periodo 4: 2016-2020, Periodo 5: 2021-2023), revistas de publicación y autores que contribuyen al campo de los temas de alimentación instantánea. En total, se obtuvieron 561 documentos.

A medida que se avanzaba en el refinamiento y la correlación de palabras a lo largo de los cinco períodos analizados en los documentos, se identificaron inicialmente 4.752 términos o palabras clave. Posteriormente, la lista se depuró hasta quedar en 111 palabras clave, mediante la agrupación de términos en sus variantes singular y plural, así como de sinónimos. La consolidación se centró en elementos clave como «proteína», «alimentos instantáneos», «reología», «propiedades interfaciales» y «emulsión», presentes en los títulos, palabras clave o resúmenes de los artículos revisados. Este proceso buscó sintetizar la información y resaltar los nodos más relevantes en cada período evaluado. Para analizar la evolución de los temas de investigación a lo largo del tiempo, se estudió la estructura de evolución y se elaboró un mapa de evolución temática empleando el índice de inclusión.

3.1. Análisis de redes temáticas

En la Figura 2 se representa la evolución de la importancia temática a lo largo del tiempo, en correlación con las palabras clave utilizadas en la matriz de búsqueda. Las esferas que representan cada periodo están interconectadas por enlaces, lo que ofrece una representación visual de las diversas tendencias en la caracterización interfacial y sus asociaciones con distintas propiedades. Las líneas continuas indican que los temas enlazados comparten el mismo nombre o que la etiqueta de un tema forma parte del otro tema. Las líneas discontinuas indican que los temas comparten elementos que no figuran en los nombres de los temas. El tamaño de cada esfera es proporcional al número de artículos publicados asociados al tema respectivo [14].

La Figura 2 subraya una notable correlación entre los temas «Proteínas - Propiedades reológicas - Interfaz - Técnica de medición», evidente por el grosor de las líneas de conexión. Esta correlación subraya el énfasis que está poniendo la investigación en la estabilización de los sistemas alimentarios multifásicos derivados de las harinas, en particular para los productos instantáneos. La atención se ha centrado en varios factores, especialmente en las técnicas de medición esenciales para evaluar y determinar la estabilidad de estos sistemas [16]. Este interés se deriva de la comprensión de que la estabilidad y la formación se ven influidas significativamente por las propiedades interfaciales [17]. En consecuencia, la optimización de estas propiedades se considera crucial para mejorar la estabilidad y funcionalidad de los alimentos instantáneos a base de harina.

Los estudios de [16] exploran técnicas avanzadas como la tensiometría, el análisis del tamaño de las partículas, la reología, la espectroscopia y las pruebas de estabilidad para investigar la estabilidad de las emulsiones alimentarias. Estas metodologías permiten una evaluación detallada de las interacciones y la eficacia de los emulsionantes proteicos y no proteicos, contribuyendo al desarrollo de productos alimentarios más estables y de mayor calidad. Proporcionan información valiosa sobre las propiedades mecánico-estructurales, las interacciones interfaciales y los cambios conformacionales de las proteínas. Además, las investigaciones de [18], [19] y [20] destacan el impacto significativo de las interacciones entre proteínas y otros componentes en sistemas multifásicos sobre las propiedades reológicas superficiales. Por ello, resulta esencial establecer la formulación, textura y estabilidad de las emulsiones. Estos estudios también subrayan la importancia de determinar propiedades dinámicas de la superficie, como la tensión interfacial y el módulo de expansión superficial, para comprender plenamente el comportamiento de los sistemas. Aunque estas investigaciones no se centran específicamente en alimentos instantáneos derivados de harinas, los principios y hallazgos relacionados con la estabilidad de emulsiones y las propiedades reológicas de los emulsionantes son relevantes para el desarrollo y mejora de estos productos.

Comprender cómo las proteínas y otros emulsionantes influyen en la estabilidad y funcionalidad es crucial para crear alimentos instantáneos con mejor textura, estabilidad y vida útil.

El análisis de las interconexiones entre los grupos a lo largo de distintos periodos revela una correlación significativa entre las propiedades interfaciales de los alimentos y las técnicas de medición utilizadas. Esta correlación también se extiende a las aplicaciones en la formulación de alimentos, lo que pone de relieve el carácter polifacético de la investigación en este campo. Aunque el término no esté siempre presente en todos los periodos, su relevancia se hace evidente a través de las agrupaciones identificadas en el análisis. En particular, las proteínas han ganado protagonismo en los dos últimos periodos, lo que refleja su creciente importancia en los esfuerzos de investigación.

Para visualizar los temas y las redes temáticas en cada periodo, se emplearon dos parámetros clave, la densidad y la centralidad. Estos parámetros facilitaron la clasificación de los temas en grupos, creando un diagrama estratégico.

Durante el periodo 1983-2000, se identificaron siete temas dentro del ámbito de investigación de los alimentos instantáneos. La Tabla 1 presenta las medidas de centralidad, densidad y rendimiento de cada uno de los grupos, lo que permite comprender las características y relaciones dentro de este periodo.

Tabla 1. Agrupaciones temáticas y documentos de base detectados por SciMAT, periodo 1981-2000.

CLÚSTER	CENTRALIDAD	DENSIDAD	NÚMERO DE DOCUMENTOS	H-ÍNDIX	CITAS PROMEDIO	NÚMERO DE CITAS
POLÍMERO	116.39	54.17	6	5	77.83	467.0
LACTOGLOBULINA	125.16	71.88	4	4	75	300
PROPIEDADES INTERFACIALES	138.91	24.83	10	10	70.4	704
PROTEÍNAS	248.95	103.49	34	21	55.67	1893
TENSIOACTIVOS	95.06	30	5	5	116	580
CINÉTICA	95.3	37.5	4	4	44	176
PELÍCULA	96.63	13.49	7	6	22.57	158

La Figura 3a muestra un diagrama estratégico del primer periodo, de 1983 a 2000, en el que se clasifican los temas en siete grupos significativos. Los temas «Proteína», «Lactoglobulina» y «Polímero» emergen como temas motores durante este periodo, considerados fundamentales y cruciales para configurar el panorama de la investigación debido a su elevada centralidad, densidad y número sustancial de citas (Tabla 1). Por el contrario, el tema «Propiedades interfaciales» se caracteriza por ser un tema transversal, con una elevada centralidad pero la menor densidad en este contexto. A pesar de tener 10 artículos y un número considerable de citas, su densidad es menor, lo que indica una aplicabilidad más amplia. El tema «Cinética» se clasifica como tema muy desarrollado y emergente, con una densidad de 37,5 y una centralidad de 95,3. Está respaldado por 4 documentos, 176 citas y un promedio de 44 citas, lo que indica su creciente importancia. Por último, los nodos «Tensioactivos» y «Película», con una centralidad baja, se designan como temas emergentes o decrecientes en este periodo.

En las redes temáticas de los temas motores, la presencia de palabras clave y sus interconexiones forman un gráfico de red. Siguiendo el planteamiento de [14], “Cada red temática se etiqueta con el nombre de la palabra clave más significativa del tema

asociado.” Así, en el primer período de 1983 a 2000, en la Figura 3b, se evidencian diversas interconexiones en torno a la palabra central «Proteínas.» La representación proporcional de cada palabra clave corresponde al número de documentos asociados a ella, y el grosor de los enlaces entre dos esferas refleja el índice de equivalencia [14].

La destacada interconexión de palabras clave como «proteínas-propiedades reológicas-interfaz» pone de relieve el papel fundamental de las proteínas en la estabilización de los sistemas alimentarios, incluidos los sistemas derivados de la harina para productos instantáneos. Como se ha señalado, estos sistemas pueden estabilizarse mediante proteínas o tensioactivos. La formación de capas interfaciales implica principalmente moléculas de proteínas adsorbidas que experimentan cambios conformacionales. Este proceso, especialmente en lo que respecta al mantenimiento de las interacciones hidrofóbicas en la interfaz, es esencial para garantizar la seguridad y la aceptabilidad del producto [21]. Por lo tanto, comprender el comportamiento del sistema interfacial es crucial para evaluar su estabilidad.

Diversos factores influyen colectivamente en las características finales del sistema interfacial, incluyendo la composición de las fases interfacial y acuosa, las condiciones de operación (como la temperatura, la presión superficial y la densidad superficial), la estructura, la estabilidad, la reología interfacial, la difusión molecular y la velocidad de formación de la película [22].

Por ejemplo, en una investigación realizada por [23], se demostró que la eficacia de la proteína de soja como estabilizante de emulsiones de aceite de maíz en agua se ve reforzada por la modificación ácida con HCl 0,05 M. La eficacia aumenta cuando la concentración total de emulsionante es del 2,0% (peso/peso), con 1,0% de proteína modificada y 1,0% de glicéridos en una proporción 1:1 a pH 5,5. Esta combinación proporciona unas propiedades interfaciales únicas lo que ilustra que las modificaciones específicas y las condiciones de formulación pueden mejorar significativamente la estabilidad de la emulsión. Estos hallazgos son especialmente relevantes para la formulación de alimentos instantáneos derivados de la harina, donde la optimización de estas características es crucial para garantizar la estabilidad durante el almacenamiento y la reconstitución, así como para mantener la textura, consistencia y vida útil del producto.

El estudio de [24] descubrió que, en presencia de proteínas en la fase acuosa, la estabilidad de la emulsión se ve influida por la proporción entre proteína y emulsionante. Además, la temperatura de almacenamiento se identificó como un factor crucial que afecta al comportamiento de la emulsión durante el almacenamiento. A 40°C, se forma una película interfacial mixta de monooleato de diglicerol y proteína en la interfase aceite-agua. Sin embargo, cuando se enfría a 5°C, la proteína es desplazada por el monooleato de diglicerol, lo que repercute directamente en la estabilidad y las propiedades reológicas. Esto sugiere que la temperatura es un factor clave que influye en el comportamiento de la proteína. Este hallazgo es especialmente relevante para los productos instantáneos derivados de harinas, que deben reconstituirse a temperaturas variables. La capacidad de los ésteres de diglicerol para proporcionar estabilidad térmica garantiza que la textura y la consistencia del producto se mantengan uniformes, independientemente de la temperatura de preparación.

En el estudio de [25], se demostró que la conformación y el comportamiento de adsorción de las proteínas vegetales pueden alterarse significativamente mediante tratamientos químicos o enzimáticos. Estas modificaciones afectan a las propiedades de las películas proteicas interfaciales, dando lugar a un aumento de la viscosidad y la elasticidad, que mejoran la estabilidad frente a la rotura. Por ejemplo, la succinilación de la proteína de haba (*Vicia faba* L.) mejora las interacciones intermoleculares y la estabilidad de las emulsiones de aceite en agua al crear películas interfaciales más elásticas y resistentes. Estos efectos son cruciales para la formulación de alimentos instantáneos

derivados de la harina, ya que contribuyen a una textura y consistencia uniformes, y ayudan a evitar la separación de fases durante la reconstitución.

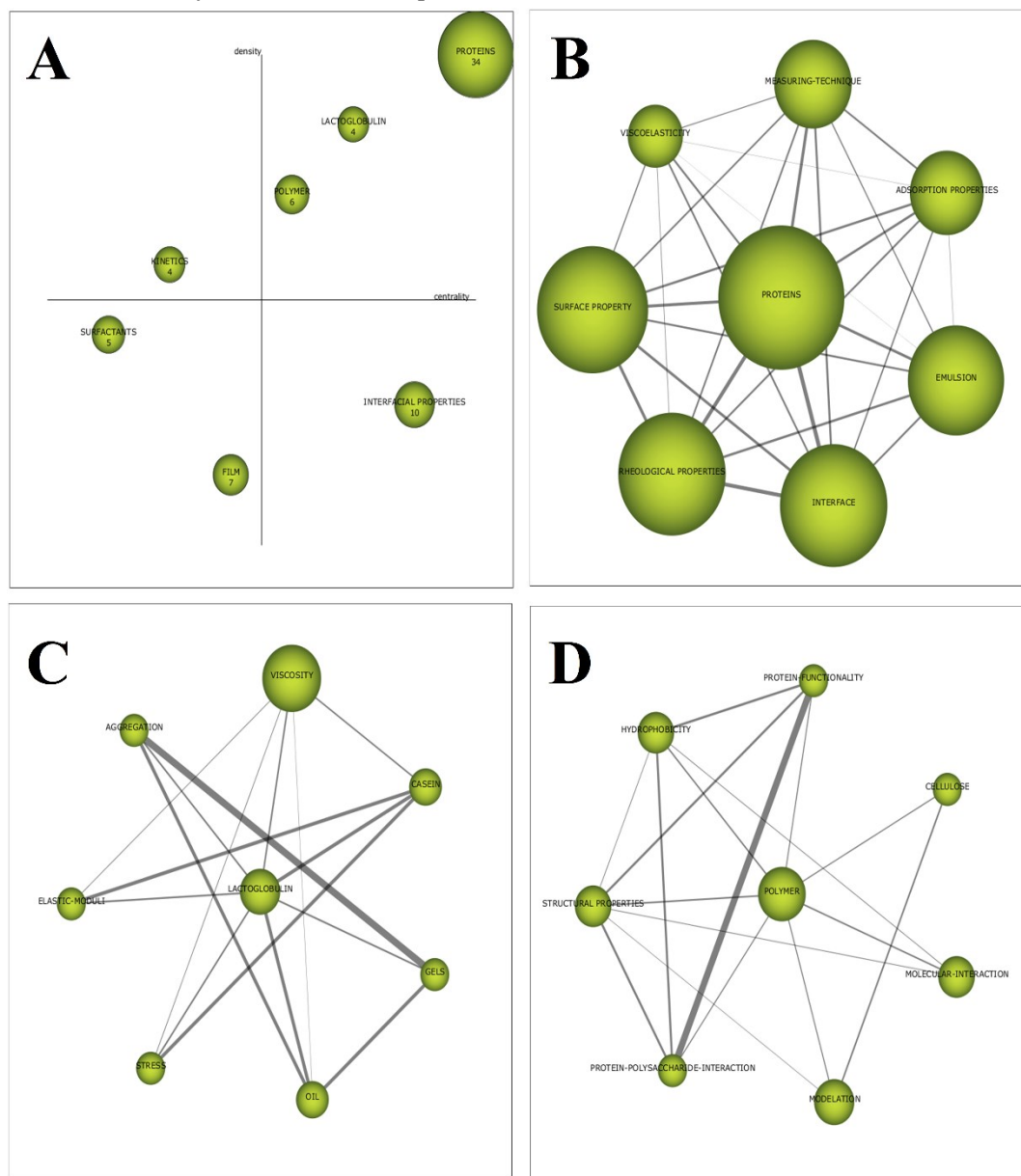


Figura 3. (a) Diagrama estratégico período 1981-2000; (b) Red temática Proteínas; (c) Red temática Lactoglobulina; (d) Red temática Polímero.

En la Figura 3c, los términos «geles», «aceites» y «agregación» muestran una fuerte correlación. En el estudio de [26] sobre emulsiones alimentarias de aceite en agua se descubrió que los principales agentes emulsionantes y estabilizadores que protegen las gotas contra la coalescencia suelen ser una mezcla de proteínas, mientras que los polisacáridos sirven como agentes espesantes y gelificantes. Las interacciones segregativas o asociativas entre polisacáridos y proteínas crean efectos secundarios adicionales sobre el comportamiento de agregación y la formación de emulsiones. Esta información es relevante para las matrices instantáneas derivadas de harinas, ya que estas se componen de carbohidratos y proteínas. [27] concluyó que durante las interacciones en la interfaz aceite-agua en la preparación de micropartículas, las proteínas presentes entre los agregados poliméricos impiden su conexión, permitiendo la formación de una película estable a presiones más altas. Esto subraya la necesidad de controlar con precisión la estabilidad y las características mecánicas de las películas interfaciales.

Las palabras "módulo elástico", "caseína" y "tensión" mostraron una fuerte correlación. Dos estudios [22], [26] han demostrado que la composición de las fases acuosa e interfacial, así como las condiciones de operación, influyen significativamente en las características interfaciales. Además, la investigación ha indicado que, en películas de emulsión, los cambios en la viscosidad interfacial, ya sea aumentando o disminuyendo, están asociados con el uso de proteínas o emulsionantes no iónicos; sin embargo, estas variaciones no afectan la estabilidad de la emulsión [28].

En la Figura 3d, los términos "interacción proteína-polisacárido", "proteína funcional" y "propiedades estructurales" están interconectados. El estudio de [26] concluye que muchas formulaciones alimentarias reales son dispersiones complejas y sistemas intrínsecamente inestables debido a su gran área interfacial. A estos sistemas se les añaden proteínas y lípidos polares como emulsionantes, los cuales pueden interactuar con otros componentes (tensioactivos de bajo peso molecular, polisacáridos) de diferentes maneras dependiendo de las condiciones de operación (pH, temperatura, presión superficial, etc.). Estas interacciones afectan las características interfaciales (estructura, estabilidad, reología, etc.) de los emulsionantes (proteínas y lípidos) en la interfaz aire-agua. Dos investigaciones [29] y [30] encontraron que las interacciones entre proteínas y polisacáridos contribuyen a la formación de capas complejas y que la dependencia de las propiedades de cizalla interfacial ofrecería una visión general de los procesos de formación de estructuras e intercambio molecular.

Durante este período, se ha destacado la importancia crítica de la composición de las matrices alimentarias. Las proteínas desempeñan un papel fundamental en la estabilidad y funcionalidad de estos sistemas, contribuyendo significativamente a la formación de estructuras interfaciales que influyen en la textura y consistencia del producto final. Por lo tanto, es esencial realizar una evaluación detallada de la composición de las harinas, considerando no solo el contenido de proteínas, sino también las interacciones entre los carbohidratos y otros componentes. Este análisis resulta crucial para optimizar la formulación de productos instantáneos, garantizando que cumplan con los estándares de calidad deseados y funcionen adecuadamente durante el almacenamiento y la reconstitución.

Durante el período comprendido entre 2001 y 2010, el diagrama estratégico (Figura 4a) identificó 10 temas de relevancia. En el cuadrante superior derecho, emergieron tres temas impulsores destacados. En primer lugar, las "Propiedades reológicas" mostraron una notable centralidad y densidad, con 148 documentos asociados, un promedio de 82.11 citas por documento y un índice h de 56 (Tabla 2).

Tabla 2. Clúster temático, documentos básicos y medidas de desempeño detectados por Scimat periodo 2001-2010.

CLÚSTER	CENTRALIDAD	DENSIDAD	NÚMERO DE DOCUMENTOS	H-ÍNDICE	CITAS PROMEDIO	NÚMERO DE CITAS
PELÍCULA	148.06	14.51	35	25.0	73.34	2567
COMPOSICIÓN QUÍMICA	149.74	20.32	35	27.0	67.65	2368
INTERFAZ AIRE-LÍQUIDO	223.7	28.98	72	41.0	101.01	7273
PROPIEDADES REOLÓGICAS	370.99	147.99	148	56.0	82.11	12153
POLISACÁRIDOS	67.7	26.12	9	9.0	204.78	1843
ABSORCIÓN DE FÁRMACOS	71.1	5.99	7	7.0	116.42	815
PROPIEDADES DILATACIONALES	91.28	5.77	14	13.0	79.71	1116
FACTORES DE TIEMPO	93.15	11.52	13	13.0	94.31	1226
PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS	96.93	27.04	5	5.0	74.8	374
BIOMATERIAL	97.52	17.27	8	8	106	848

De manera similar, la "Interfaz aire-líquido" presentó alta centralidad y densidad, con 72 documentos, 7273 citas y un índice h de 41. Finalmente, la "Composición química" destacó con una centralidad de 149.74 y una densidad de 20.32, respaldada por 35 documentos, 2368 citas y un índice h de 27. Por otro lado, los temas "Polisacáridos" y "Propiedades viscoelásticas" se ubicaron en el cuadrante superior izquierdo, lo que indica su potencial para evolucionar como temas impulsores según su centralidad y densidad (Tabla 2). Estos temas acumularon 1843 y 374 citas en 9 y 5 documentos, respectivamente. En contraste, los temas "Factores de tiempo", "Absorción de fármacos" y "Propiedades dilatacionales" se consideraron emergentes debido a su baja densidad y centralidad. A pesar de contar con un número elevado de citas—1226, 815 y 1116, respectivamente—en 13, 7 y 14 artículos, el promedio de citas fue de 94.31, 116.42 y 116.42 por documento. Finalmente, "Biomaterial" y "Película", clasificados como temas transversales por su centralidad y densidad, también mostraron un número notable de citas—848 y 2567—y un impacto respetable reflejado en sus índices h de 8 y 25, respectivamente.

Durante el período comprendido entre 2001 y 2010, el diagrama estratégico (Figura 4a) identificó 10 temas de relevancia. En el cuadrante superior derecho, emergieron tres temas impulsores de manera destacada. En primer lugar, las "Propiedades reológicas" mostraron una notable centralidad y densidad, con 148 documentos asociados, un promedio de 82.11 citas por documento y un índice h de 56 (Tabla 2). De manera similar, la "Interfaz aire-líquido" demostró alta centralidad y densidad, con 72 documentos, 7273 citas y un índice h de 41. Finalmente, la "Composición química" destacó con una centralidad de 149.74 y una densidad de 20.32, respaldada por 35 documentos, 2368 citas y un índice h de 27. Por otro lado, los temas "Polisacáridos" y "Propiedades viscoelásticas" se ubicaron en el cuadrante superior izquierdo, lo que indica su potencial para evolucionar como temas impulsores basados en su centralidad y densidad (Tabla 2). Estos temas acumularon 1843 y 374 citas en 9 y 5 documentos, respectivamente. En contraste, los temas "Factores de tiempo", "Absorción de fármacos" y "Propiedades dilatacionales" se encontraron débilmente desarrollados debido a su baja densidad y centralidad, por lo que se consideran temas emergentes. A pesar de tener un número elevado de citas—1226, 815 y 1116 respectivamente—en 13, 7 y 14 artículos, su promedio de citas fue de 94.31, 116.42 y 116.42 por documento. Por último, "Biomaterial" y "Película", clasificados como temas transversales por su centralidad y densidad, también mostraron un número notable de citas—848 y 2567—junto con un impacto respetable reflejado en sus índices h de 8 y 25, respectivamente.

En las redes temáticas de los temas motores durante el período de 2001 a 2010, se observó que no existen interconexiones pronunciadas alrededor de las palabras centrales. En la Figura 4b, la palabra central "propiedades reológicas" está rodeada por 7 palabras, siendo "propiedades superficiales" la más citada, seguida por "proteínas" e "interfaz". Estas palabras también muestran la mayor correlación entre ellas, lo que indica que los estudios durante este período se centraron principalmente en las propiedades interfaciales en sistemas multifásicos. En la Figura 4c, la palabra central "interfaz aire-líquido" forma la red temática con 7 palabras, siendo "propiedades interfaciales" la más citada y encabezando la lista de documentos. Finalmente, en la Figura 4d, la palabra "propiedades térmicas" lidera la lista de documentos.

Durante este período, la investigación sobre las propiedades interfaciales de los sistemas alimentarios se centró principalmente en la evaluación de parámetros como las propiedades superficiales. Por ejemplo, una investigación [31] destaca que propiedades superficiales como la tensión superficial y la elasticidad son cruciales para la formación de espumas o emulsiones, dependiendo del tipo de molécula utilizada para estabilizar la capa adsorbida. Los polímeros son más efectivos cuando forman una capa adsorbida viscoelástica sólida, un fenómeno comúnmente observado con las proteínas, que se adsorben, se despliegan parcialmente y forman interacciones fuertes.

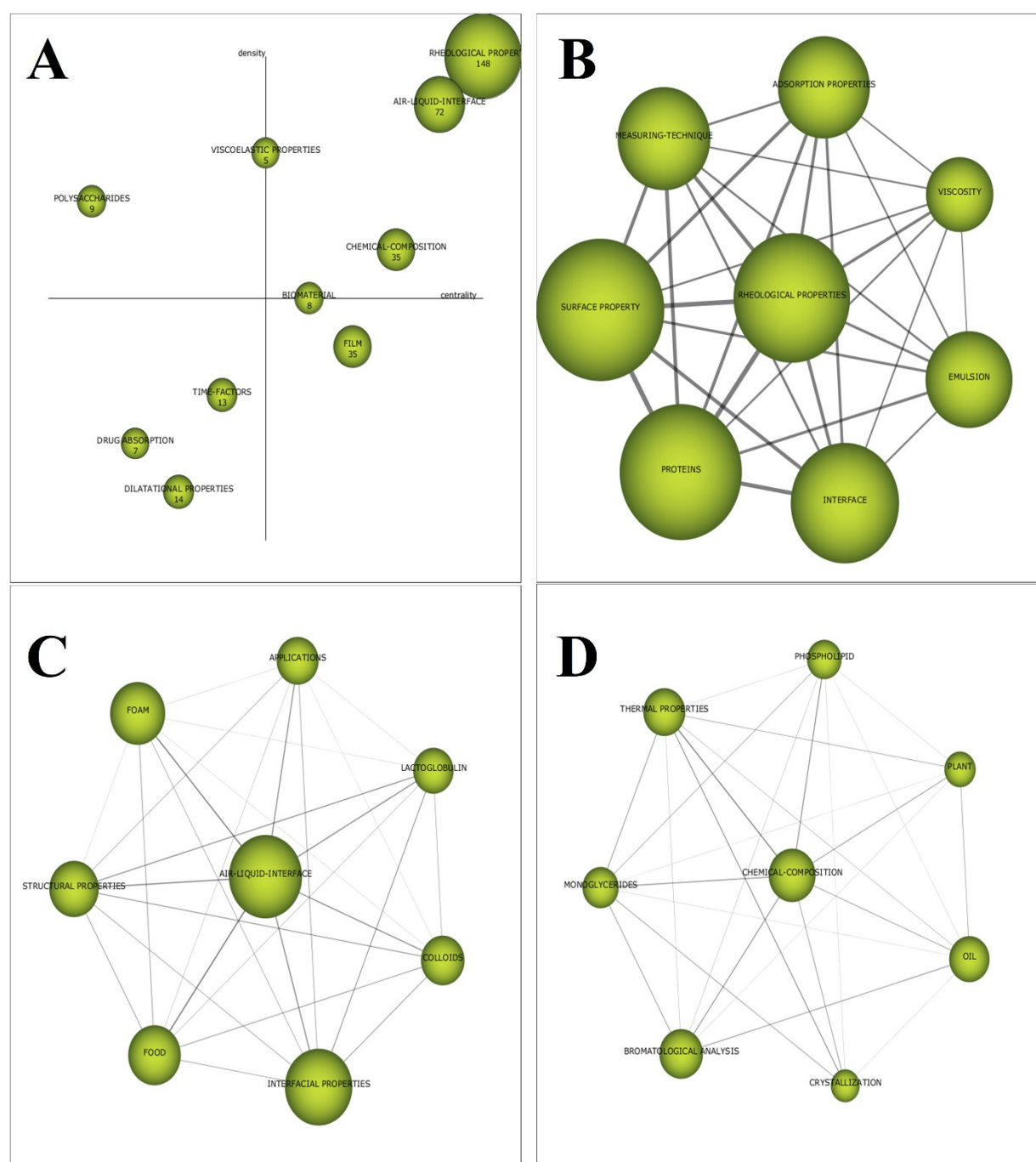


Figura 4. (a) Diagrama estratégico período 2001-2010; (b) Red temática Propiedades reológicas; (c) Red temática Interfaz aire-líquido; (d) Red temática Composición química.

Dos investigaciones [32] y [33] subrayan que, para la formación de películas de espuma, la tasa de adsorción y la capacidad de desplegarse en la interfaz son factores clave. Además, se observó que las emulsiones estabilizadas por proteínas tienden a retardar el empaquetamiento cuando se evalúan en cremas, lo que lleva a una red de gotas de emulsión de menor densidad. En contraste, las emulsiones estabilizadas por surfactantes resultan en una capa de crema concentrada y bien empaquetada. Ambos estudios destacan que una comprensión detallada de las propiedades superficiales es esencial para diseñar y optimizar productos alimenticios con características específicas de estabilidad y rendimiento. En la investigación de [34], se concluyó que las capas de proteínas adsorbidas exhiben módulos elásticos y viscosos interfaciales significativos, lo que resalta la importancia de la reología de cizallamiento interfacial para comprender la

estabilidad y el comportamiento. El estudio encontró además que estas propiedades dependen tanto de la concentración como del tipo de proteína, así como de la composición de las fases líquidas. Sugiere que ciertas proteínas pueden formar una capa de interacción en la interfaz líquido/líquido, lo que podría contribuir significativamente a la estabilidad a largo plazo de las emulsiones.

En relación con las interfaces aire-líquido, tres estudios [35], [36] y [37] destacan la importancia de las propiedades interfaciales en la estabilidad y el comportamiento de emulsiones y espumas. Estos estudios exploraron diversas técnicas interfaciales y complementarias para analizar las características estáticas y dinámicas de las películas mixtas compuestas por β -caseína y monoglicéridos, así como aislado de proteína de suero y monoglicéridos (monopalmitina y monooleína), extendidas en la interfaz aire-agua a pH 7 y 20°C. A través de mediciones controladas de esfuerzo y deformación de las propiedades reológicas de cizallamiento en las interfaces aire/líquido, los investigadores encontraron que la presión superficial de las monocapas insolubles podría ajustarse modificando la concentración interfacial de los surfactantes. Se observó que la viscosidad de cizallamiento superficial (η_s) dependía tanto de la presión superficial como de la composición de la película mixta, variando significativamente con la presión superficial. Específicamente, presiones superficiales más altas correspondían a mayores valores de η_s . Estos resultados tienen implicaciones significativas para las características de cizallamiento de las películas alimenticias combinadas. En los alimentos instantáneos derivados de harinas, las películas alimenticias mixtas compuestas por proteínas y carbohidratos son cruciales para asegurar la estabilidad y funcionalidad. La presión superficial influye significativamente en las propiedades de cizallamiento de estas películas, siendo que presiones más altas aumentan la viscosidad. Este aumento en la viscosidad es esencial para mantener la textura, consistencia y durabilidad durante el almacenamiento y la reconstitución.

En la Figura 5a, se muestra la relación entre las palabras clave más importantes durante el periodo 2011-2015. Es evidente que el número de palabras clave continúa aumentando, con un total de 11 identificadas en este caso. Entre estas palabras clave, "Interface" destaca significativamente por su densidad y centralidad (Tabla 3). Este clúster está asociado con 86 documentos, con un total de 4479 citas y un índice h de 36. Esto indica que el tema de "Interface" es importante y está bien desarrollado, dado su posicionamiento central, alta centralidad y alta densidad. Estas características confieren relevancia al estudio de este tema, como lo evidencia la considerable cantidad de investigaciones que rodean estos documentos. De manera similar, en el cuadrante superior derecho, los temas "interacción molecular", "propiedades estructurales" y "viscoelasticidad" se identifican como posibles temas impulsores de este período. Estos temas presentan alta centralidad y densidad, junto con un respetable número promedio de citas, como se describe en la Tabla 3. Esto puede atribuirse a diversos estudios [38], [39], [40], [41], que se enfocaron en demostrar cómo las interfaces adquieren estructuras complejas basadas en las propiedades materiales e interacciones moleculares. Además, estos estudios destacaron el papel de la tensiometría interfacial o la reología para apreciar la importancia de las interfaces en diversos procesos.

Tabla 3. Clúster temático, documentos básicos y medidas de desempeño detectados por Scimat periodo 2011-2015.

CLÚSTER	CENTRALIDAD	DENSIDAD	NÚMERO DE DOCUMENTOS	H-ÍNDICE	CITAS PROMEDIO	NÚMERO DE CITAS
INTERFAZ	384.01	145.71	86	36	52.08	4479
PROPIEDADES ESTRUCTURALES	223.37	27.93	38	22	42.45	1613

INTERACCIÓN MOLECULAR	158.88	32.91	16	11	36.06	577
VISCOELASTICIDAD	141.05	22.51	17	12	54.29	923
LACTOGLOBULINA	133.36	12.42	18	15	58.0	1044
DISOLVENTE	102.28	15.44	8	7	23.38	187
ABSORCIÓN DEL FÁRMACO	91.65	34.07	8	7	51.75	414
ESPUMA	79.79	3.61	8	8	42.75	342
DISPERSIÓN	75.99	87.04	4	4	51.25	205
REOLOGÍA SÓLIDO	63.5	10.32	5	5	49.4	247
CINÉTICA	43.12	7.92	3	3	24.67	74

Debido a su densidad y centralidad, los temas identificados como transversales durante este período incluyen "Lactoglobulina" y "disolvente", enfocados en el análisis y caracterización de diversos sistemas mezclados. En el estudio de [42], se descubrió que las propiedades de adsorción y la reología interfacial de las capas de β -caséina/ β -lactoglobulina están predominantemente influenciadas por las moléculas de β -caséina, que probablemente son las proteínas más abundantes en la interfaz. De manera similar, [43] demostró que el esfuerzo de fluencia y la elasticidad de las espumas acuosas están determinados por la viscosidad de la fase continua y las propiedades interfaciales. Esto es crucial para controlar la textura y estabilidad de las espumas en productos instantáneos. El estudio concluyó que el esfuerzo de fluencia aparente (τ_y), que representa el estrés crítico al que las burbujas de aire ceden, depende directamente de la viscosidad de la solución.

Las palabras clave "Reología sólida", "Cinética" y "espuma" son identificadas como temas emergentes, caracterizados por sus bajos indicadores bibliométricos (Tabla 3). Se sabe que las propiedades reológicas de las espumas juegan un papel crucial en la determinación de la calidad de varios productos, incluidos los productos instantáneos. Se han desarrollado diversas metodologías para predecir parámetros característicos como la resistencia aparente al esfuerzo y el módulo de almacenamiento, que proporcionan información sobre propiedades físicas como el tamaño de las burbujas y la tensión superficial [44]. Por ejemplo, en el estudio de [45], se emplearon mediciones reológicas de espuma y métodos sensibles a la interfaz, como la reología dilatacional de la superficie. Los investigadores identificaron que, bajo condiciones de pH crecientemente alcalinas y ácidas, las interacciones proteína-proteína pasaron de un régimen atractivo a uno altamente repulsivo, lo que resultó en la formación de monocapas y moléculas de agua ordenadas y altamente polares. Este estudio demostró que los cambios en el grosor de la capa y las interacciones proteína-proteína, ya sean atractivas o repulsivas, modifican significativamente la elasticidad dilatacional interfacial. Esta información es crucial para los productos instantáneos derivados de harinas, ya que un entendimiento detallado de estas propiedades permite optimizar la textura y estabilidad del producto. De manera similar, la absorción de fármacos también es un tema bien desarrollado, como lo señalan los estudios de [46] y [47], que brindan perspectivas relevantes para la industria alimentaria. Estos estudios demuestran que la técnica de polielecrodo capa por capa mejora la encapsulación y liberación controlada de compuestos, lo cual podría ser beneficioso para integrar ingredientes activos en productos instantáneos. Además, resaltan la importancia del comportamiento interfacial en diversas mezclas de proteínas y surfactantes.

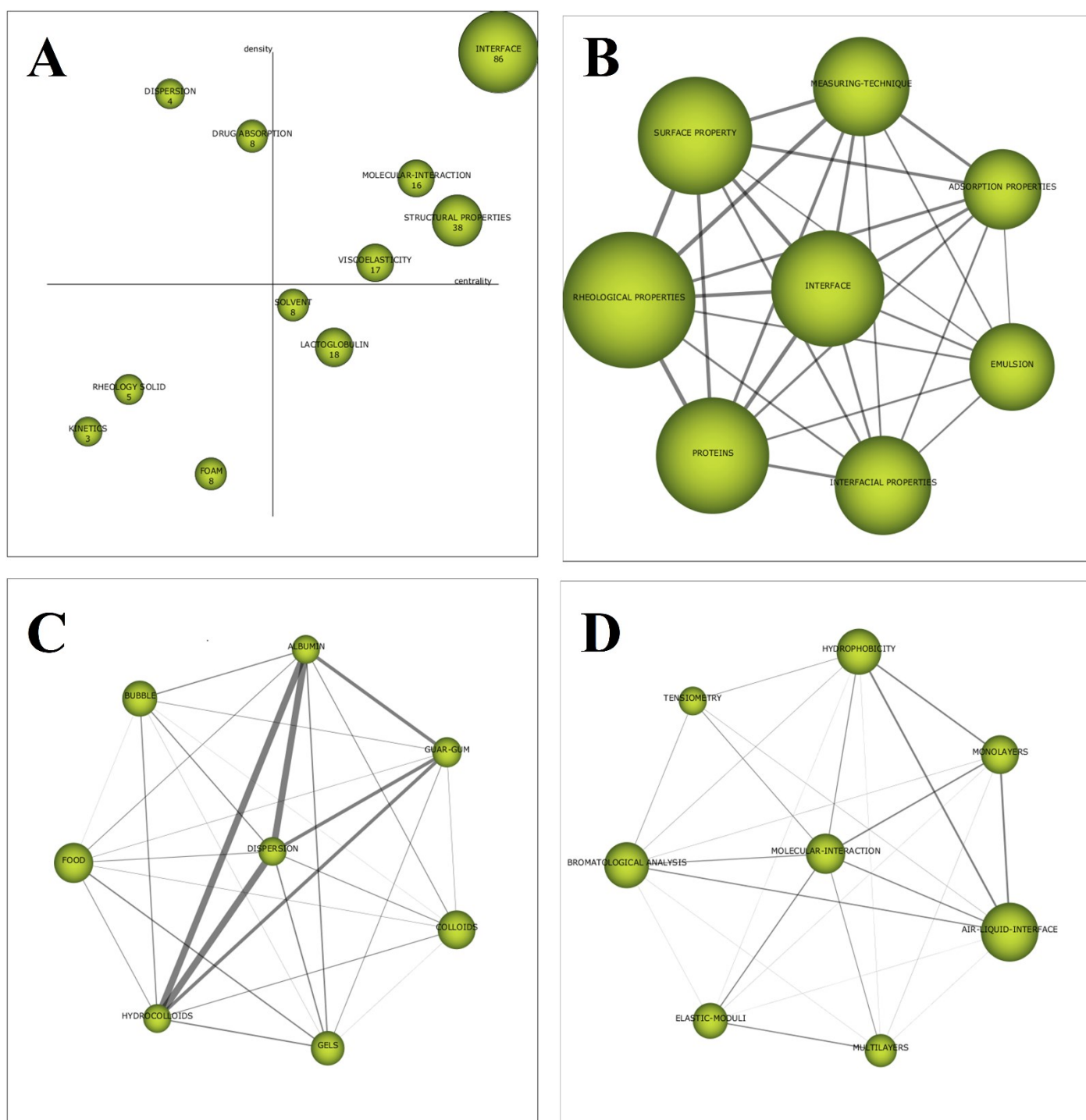


Figura 5. (a) Diagrama estratégico período 2011-2015; (b) Red temática Interface; (c) Red temática Dipsersión; (d) Red temática Interacción molecular.

Para la presentación de las redes temáticas durante este período, la Figura 5b destaca "Interfaz" como una palabra central. Varios estudios destacan que comprender las propiedades de adsorción, superficie, interfaciales y reológicas es crucial, especialmente en el caso de emulsiones estabilizadas por proteínas, para controlar la consistencia del producto y lograr los atributos texturales deseados en productos instantáneos multifacéticos. Por ejemplo, en la investigación de [48], se investigó el comportamiento viscoelástico interfacial de dos tipos de hidrolizados de proteína de soja obtenidos por hidrólisis selectiva y limitada. Estos hidrolizados se adsorbieron en la interfaz aceite/agua para formar una interfaz fluida con bajo módulo de cizalladura interfacial. Debido a las

propiedades viscoelásticas de las proteínas globulares, se formaron películas interfaciales con altos módulos elásticos y viscosos. El estudio concluyó que la hidrólisis selectiva puede mejorar significativamente las propiedades emulsionantes y reológicas de la proteína de soya, siendo esta mejora en las propiedades interfaciales crucial para optimizar la estabilidad y el rendimiento de las emulsiones en productos alimenticios, facilitando la formulación de productos con mejor textura y consistencia. Los experimentos de barrido dinámico de tiempo indicaron además que una mayor rapidez en la adsorción podría facilitar la formación de tamaños de gota más pequeños, evitando así la coalescencia durante la formación de la emulsión. Esto proporciona información valiosa para la preparación de productos de proteína de soya altamente emulsionantes. Estos estudios subrayan que la optimización de las propiedades interfaciales y viscoelásticas, como la hidrólisis selectiva de proteínas, es esencial para evitar problemas de separación y mejorar la homogeneidad en emulsiones. Para los alimentos instantáneos derivados de harinas, estas mejoras contribuyen a una reconstitución más eficiente y una experiencia de consumo más consistente.

Por otro lado, el tema de "dispersión" emerge como un tema altamente desarrollado, y su red temática (Figura 5c) demuestra una clara correlación con palabras clave como "hidrocoloides", "albúmina" y "goma guar". Esta correlación surge porque los hidrocoloides están asociados con el espesamiento y la gelificación, ejerciendo influencia sobre las propiedades de los sistemas dispersos a través de sus características interfaciales. Dentro de las emulsiones, funcionan como emulsionantes y estabilizadores, mostrando mayor eficiencia bajo condiciones ácidas [49]. Además, las gomas son reconocidas como estabilizadores comunes en alimentos presentes en muchos productos de consumo, desempeñando un papel crucial en el mantenimiento de la estabilidad, calidad y funcionalidad [50].

Finalmente el tema interacción molecular posee relevancia en la formulación de productos instantáneos debido a que las interacciones moleculares están fuertemente influenciadas por factores como el peso molecular, la densidad de carga y la concentración de las proteínas y polisacáridos empleados, y son especialmente sensibles a la fuerza iónica, el pH y la temperatura de la solución [51]. El comportamiento de los componentes de la harina durante el procesamiento y almacenamiento, influyen directamente en la calidad final del producto sobre sus propiedades de textura, solubilidad, estabilidad y capacidad de rehidratación, las cuales son esenciales para productos instantáneos.

Durante el periodo de 2016 a 2020, el mapa de evolución temática (Figura 6a) muestra que los temas predominantes incluyen "Técnica de medición," "Composición química," "Interacción molecular" y "Transición de fase." Estos temas son fundamentales, ya que comprenderlos permite optimizar procesos para lograr funcionalidades deseadas, como una mayor estabilidad. "Técnica de medición" destaca por su alta estabilidad y densidad (Tabla 4 y Figura 6b). Esto se debe al papel crucial de las técnicas de medición eficientes para entender y analizar propiedades, lo que proporciona información valiosa sobre el comportamiento de los materiales en las interfaces. De manera similar, estudiar la composición química y las interacciones moleculares de las sustancias es esencial. Cada compuesto juega un papel clave en la determinación de su comportamiento, y comprender estos aspectos ofrece valiosas perspectivas sobre cómo interactúan las sustancias entre sí.

Tabla 4. Clúster temático, documentos básicos y medidas de rendimiento detectadas por Scimat periodo 2016-2020.

CLÚSTER	CENTRALIDAD	DENSIDAD	NÚMERO DE DOCUMENTOS	H-ÍNDICE	CITAS PROMEDIO	NÚMERO DE CITAS
TÉCNICA DE MEDICIÓN	385.09	126.34	118	35	28.03	3308
COMPOSICIÓN QUÍMICA	237.36	33.43	63	25	25.29	1593
INTERACCIÓN MOLECULAR	197.15	30.16	37	17	21.54	797
CINÉTICA	115.61	17.09	14	10	27.86	390
HUMANO	99.59	22.2	14	12	22.86	320
PROPIEDADES TÉRMICAS	118.1	15.13	13	9	22.38	291
GELES	103.04	11.99	13	9	30.38	395
DISPERSIÓN	87.34	15.76	7	6	32.86	230
HIDROLIZADOS DE PROTEÍNAS	84.96	25.82	6	6	65.5	393
TRANSICIÓN DE FASE	104.3	23.19	4	4	25.75	103
DISOLVENTE	45.96	4.22	5	4	7.8	39

De manera similar, "hidrolizados de proteínas" y "humano" se sitúan en el cuadrante superior izquierdo, lo que indica que poseen enlaces internos bien desarrollados, pero son de importancia marginal en el campo general de estudio [14]. El estudio de [52] evaluó la coalescencia parcial en emulsiones y encontró que, cuando estas se estabilizan con proteínas, la rigidez interfacial y las fuerzas superficiales repulsivas a largo alcance dificultan la inestabilidad. Sin embargo, con la adición de surfactantes de bajo peso molecular, las propiedades interfaciales y las fuerzas superficiales se modifican, promoviendo generalmente la coalescencia parcial. La investigación de [53] se centró en determinar y analizar el efecto de las proteínas y el almidón en la estabilidad de la espuma. Encontraron que se producían mejoras interfaciales en las emulsiones debido a la interacción del almidón con la capa interfacial de proteínas, lo que resultaba en estabilizadores efectivos de sistemas de espuma húmeda. El estudio de [54] descubrió que, cuando el aislado de proteína de suero se usa como agente espumante y la goma xantana como agente espesante, las espumas pueden mantener sus características de rigidez, lo que las hace adecuadas para procesos de espuma continua en la industria alimentaria. Estos estudios indican que las proteínas y sus hidrolizados son cruciales para estabilizar emulsiones y espumas, y la adición de surfactantes y almidones puede mejorar aún más estas propiedades. Esto es particularmente importante para los alimentos instantáneos, ya que asegura una dispersión uniforme y una estabilidad prolongada durante la reconstitución.

El nodo "humano" emerge como relevante en varios artículos relacionados con las propiedades interfaciales. Por ejemplo, en la investigación de [55], se investigó el comportamiento interfacial de capas de biopolímeros en condiciones digestivas in vitro. Este estudio proporciona valiosas perspectivas para el diseño de alimentos instantáneos que liberen nutrientes de manera controlada. Mediante estas técnicas, es posible desarrollar formulaciones de alimentos instantáneos con biopolímeros que resisten las condiciones digestivas iniciales y se desintegran de manera controlada. Este enfoque podría mejorar la absorción de nutrientes y ofrecer beneficios adicionales para la salud, como la entrega efectiva de probióticos o compuestos bioactivos.

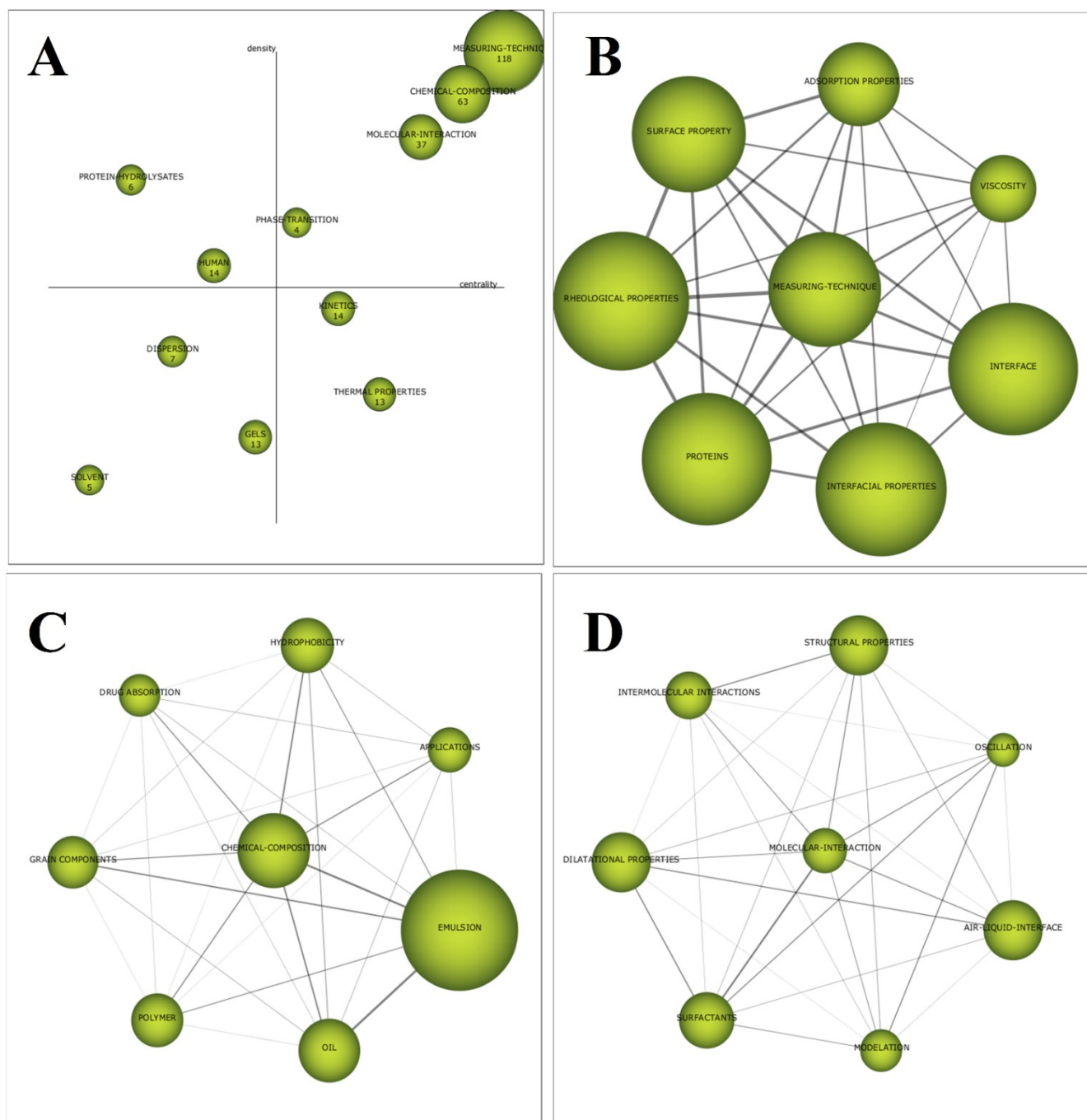


Figura 6. (a) Diagrama estratégico período 2016-2020; (b) Red temática Técnica de medición; (c) Red temática Composición química; (d) Red temática Interacción molecular.

"Propiedades térmicas" y "cinética" han emergido como temas prominentes, como lo evidencian los estudios de [56], [57], [58], que profundizaron en la investigación de la cinética de adsorción y sus implicaciones en la formación de espumas y emulsiones, junto con las estructuras interfaciales y atributos reológicos de estos sistemas, que ejercen una influencia significativa sobre su estabilidad. En contraste, "dispersiones", "geles" y "disolvente" se identifican como temas generales debido a su menor densidad y centralidad en la red temática. Si bien no son los puntos centrales de investigación, siguen siendo significativos en varios estudios dentro del campo. Es probable que estos temas se crucen con otras áreas clave y contribuyan a una comprensión integral de los sistemas multifásicos, aunque con menos énfasis en investigaciones individuales.

Durante este periodo, las redes temáticas de los temas predominantes se representan según su densidad y centralidad. En la Figura 6b, el tema central "técnica de medición" está rodeado por palabras clave que representan un volumen sustancial, correspondiente al número de documentos asociados. A lo largo de este período, los estudios sobre las propiedades interfaciales de los alimentos se centraron principalmente en el uso de diversas técnicas de medición. Por ejemplo, el estudio de [59] investiga mezclas de colágeno y surfactantes en interfaces fluido/fluido utilizando técnicas avanzadas de medición como la reología interfacial y la espectroscopía de adsorción. Estas técnicas permiten una caracterización detallada de las propiedades mecánicas y estructurales de las capas interfaciales. Estos métodos podrían adaptarse para monitorear y controlar la calidad de las interfaces en productos instantáneos derivados de harinas. Esta adaptación permitiría ajustes en las formulaciones y procesos de fabricación, mejorando las interacciones de los ingredientes y optimizando la funcionalidad del producto. De manera similar, el estudio de [60] preparó nanopartículas y fibrilas de β -lactoglobulina a pH 7.0 y pH 4.0, controlando la temperatura, para comparar sus propiedades espumantes y emulsificantes utilizando diversas técnicas, incluyendo un analizador de espuma, un analizador de tamaño de micropartículas, un reómetro interfacial y un microscopio de fuerza atómica para caracterizar las funcionalidades espumantes/emulsificantes y las microestructuras/mejoras interfaciales. Estas técnicas son cruciales para determinar las condiciones del proceso que impactan en la estabilidad, textura y atributos sensoriales de los productos emulsionados. Al medir las propiedades interfaciales, se pueden identificar los agregados de proteínas más efectivos para estabilizar espumas y emulsiones, lo que es particularmente importante para los alimentos instantáneos derivados de harinas. El uso de diversas técnicas de medición proporciona una comprensión integral de estas propiedades, permitiendo la optimización de las características del producto y mejorando su desempeño durante la reconstitución.

En la Figura 6c, se evidencia una correlación más pronunciada entre "composición química," "aceite" y "emulsión". La investigación de [61] evalúa las propiedades viscoelásticas interfaciales de las capas de proteína de frijol (*Vicia faba*) en emulsiones aceite/agua en función del pH. El estudio destaca cómo la composición química y el pH influyen en la estabilidad y las propiedades emulsificantes de las proteínas de frijol, encontrando que el pH 7 es óptimo para lograr la mejor estabilidad y propiedades viscoelásticas de las capas interfaciales. Las proteínas demuestran una buena capacidad de adsorción y forman capas estables en la interfaz, mejorando la estabilidad general de la emulsión. Esta evaluación de las proteínas de frijol puede guiar la incorporación de aceites nutritivos en productos de alimentos instantáneos derivados de harinas, asegurando estabilidad sin comprometer la calidad del producto.

Finalmente para la Figura 6d se evidencia una correlación entre interacción molecular, surfactantes y las propiedades dilatacionales. En el estudio de [62] enfatiza en las interacciones entre surfactantes y enzimas, puesto que su comprensión es esencial para aplicaciones en las industrias alimentaria. Los surfactantes se unen a las enzimas a través de mecanismos diversos, incluyendo fuerzas hidrofóbicas, enlaces de hidrógeno e interacciones electrostáticas. Estas interacciones influyen en las propiedades de dilatación de las interfaces de los surfactantes, alterando la conformación y actividad de las enzimas, lo que impacta la tensión superficial y la estabilidad de emulsiones, aspectos cruciales para la formulación de productos.

Para el período 2021 - 2023, la Figura 7a muestra la lista de las 10 palabras clave más importantes. Además, se evidencia por su centralidad y densidad (Tabla 6) que los temas "Técnica de medición", "Análisis bromatológico" y "Nanoestructuras" emergen como los

temas principales durante este período, respaldados por un número considerable de documentos y citas. Como se mencionó en el período anterior, las técnicas de medición juegan un papel crucial en la identificación del comportamiento y desempeño de los componentes en las interfaces. El análisis bromatológico gana relevancia en este período, ya que representa una alternativa esencial en el análisis composicional, proporcionando información analítica sobre la composición, las cualidades organolépticas y las posibles alteraciones [63].

Tabla 5. Agrupación temática, documentos básicos y medidas de rendimiento detectadas por Scimat periodo 2021-2023.

CLÚSTER	CENTRALIDAD	DENSIDAD	NÚMERO DE DOCUMENTOS	H-ÍNDICE	CITAS PROMEDIO	NÚMERO DE CITAS
TÉCNICA DE MEDICIÓN	287.65	99.67	90	12	6.63	597
AGENTES TENSIOACTIVOS	54.19	68.58	5	3	4.6	23
ESPUMA	88.21	6.94	15	4	5	75
ALIMENTOS	44.47	31	4	3	15	60
CONTENIDO EN PROTEÍNAS	69.65	29.4	4	2	3.75	15
ANÁLISIS BROMATOLÓGICO	191.09	27.46	36	10	7.72	278
NANOESTRUCTURAS	115.59	24.77	20	6	7.05	141
CINÉTICA	83.1	21.11	7	3	3.0	21
PROPIEDADES DILATACIONALES	107.38	16.25	15	6	8.13	122
ENZIMAS	82.8	14.44	7	4	5.57	39

Además, la reología y la estabilidad de las emulsiones están estrechamente interrelacionadas durante este período. La reología de los sistemas multifásicos no puede ser comprendida de manera integral sin considerar parámetros estructurales, como la reología de la fase continua, la naturaleza de las partículas y las interacciones entre partículas [64]. Esto subraya la importancia de entender los aspectos estructurales de las formulaciones y su relación con las propiedades reológicas para lograr estabilidad y las características funcionales deseadas. Al analizar cómo las proteínas y otros componentes interactúan en la interfaz, es posible optimizar las formulaciones para mejorar la estabilidad y el rendimiento en los productos alimentarios instantáneos.

Es crucial destacar que la fuente y composición de la subfase juegan un papel clave en la selección de la estrategia óptima de estabilización en sistemas alimentarios multifásicos que utilizan proteínas vegetales [65]. La estabilidad dentro del sistema es fundamental y se considera lograda cuando no hay cambios en la distribución del tamaño o disposición espacial de las gotas durante el tiempo experimental o de almacenamiento [64]. Además, las "Nanoestructuras" emergen como un aspecto relevante en el estudio de sistemas multifásicos. [66] y [67] demostraron el potencial de las nanoestructuras para mejorar la estabilidad y funcionalidad de emulsiones y productos alimenticios instantáneos.

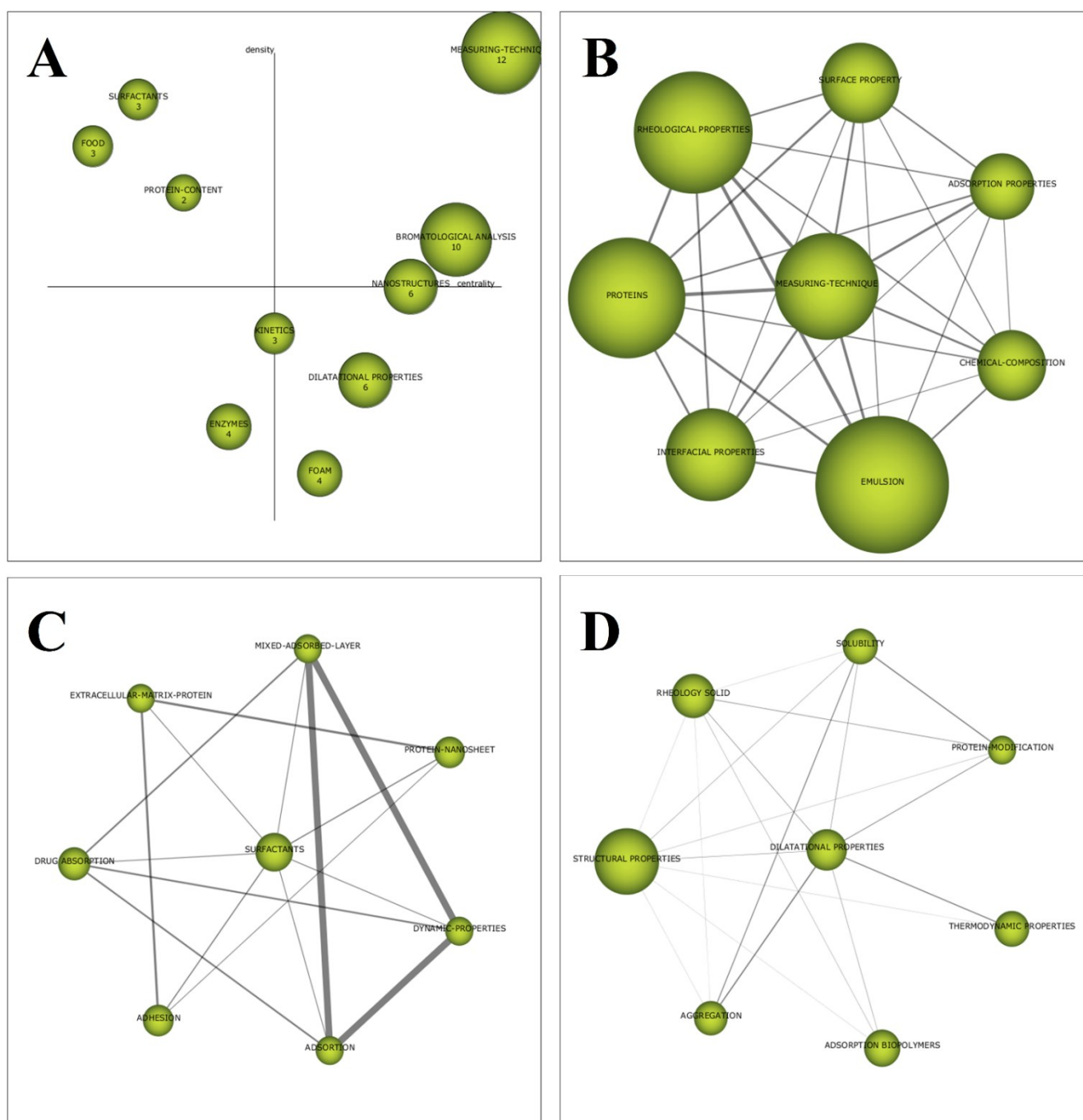


Figura 7. (a) Diagrama estratégico período 2016-2020; (b) Red temática Técnica de medición; (c) Red temática Agentes tensioactivos; (d) Red temática Propiedades dilatacionales.

En [66] demostraron que las nanopartículas de proteínas pueden estabilizar emulsiones mejorando su viscosidad y estabilidad oxidativa, lo cual es particularmente beneficioso para las harinas instantáneas, mejorando la textura y durabilidad del producto. [67] resaltaron cómo la encapsulación de compuestos activos mejora su biodisponibilidad, enfatizando la necesidad de controlar el tamaño y la estabilidad de las gotas para una aplicación efectiva. Además, [68] investigaron nanopartículas de proteínas de nuez combinadas con proteínas fibrilares de arroz desplegadas para crear nanoestructuras de proteínas duales, las cuales fueron efectivas para emulsionar aceite de nuez y mostraron una resistencia superior al calor y a los ciclos de congelación-descongelación. La integración de nanoestructuras en el desarrollo de harinas instantáneas puede mejorar significativamente la estabilidad de las emulsiones durante la

deshidratación y almacenamiento, así como su resistencia a fluctuaciones de temperatura, optimizando así la calidad y funcionalidad del producto final y facilitando la incorporación de compuestos funcionales.

Se identifican como temas altamente desarrollados "Surfactantes", "alimento" y "contenido proteico", debido principalmente al papel crítico que juegan los surfactantes en las propiedades interfaciales de los productos alimenticios, especialmente aquellos con alto contenido proteico. La combinación de diferentes surfactantes modula sus características interfaciales, impactando directamente la mejora de los atributos fisicoquímicos y nutricionales [68]. Las interacciones entre proteínas y surfactantes representan un área crucial tanto para la comprensión fundamental como para las aplicaciones tecnológicas. Se emplean diversas técnicas experimentales y enfoques de análisis de datos para caracterizar estas interacciones tanto a granel como en las interfaces. Entre ellas, las técnicas basadas en tensiometría, como la tensiometría de análisis de perfil de gotas, se destacan como métodos poderosos para caracterizar las capas de adsorción de proteínas-surfactantes en las interfaces. Estas técnicas proporcionan valiosos conocimientos sobre la tensión interfacial dinámica y en equilibrio, así como el análisis reológico dilatacional (Figura 7d), generando datos cruciales como cinéticas de adsorción, isothermas y parámetros relacionados con la actividad superficial [68]. Esencialmente, los surfactantes juegan un papel clave en la regulación de las propiedades interfaciales, mejorando la estabilidad, la modificación de la textura y los atributos sensoriales. Comprender estas interacciones es fundamental para avanzar en estrategias innovadoras para optimizar las técnicas de procesamiento de alimentos, especialmente para formulaciones instantáneas derivadas de harinas.

Se identifican como temas emergentes "Enzimas" y "Cinética", lo que sugiere que son temas en desarrollo en el contexto de las propiedades interfaciales de los alimentos instantáneos. Esto implica que están siendo desarrollados durante el período de estudio. "Propiedades dilatacionales" y "Espuma", a pesar de su baja densidad, se identifican como temas transversales, aunque presentan conexiones internas con otros temas como la agregación-solubilidad-modificación de proteínas, propiedades térmicas y propiedades viscoelásticas, todos relacionados con alimentos instantáneos. El estudio de [69] investiga cómo las proteínas de colza y los oleosomas compiten por la interfaz aire-agua y su impacto en las propiedades espumantes de las mezclas. Se encontró que la presencia de proteínas de colza mejora la estabilidad de la espuma proporcionando una cobertura más eficiente en la interfaz aire-agua, mientras que los oleosomas afectan de manera diferente la formación y estabilidad de la espuma. [70] exploró cómo las proteínas de arroz, cuando se complejan con iones metálicos de transición y se combinan con poliglicósidos alquilados, pueden estabilizar espumas duraderas. Específicamente, se descubrió que las proteínas de arroz hidrolizadas, junto con metales de transición, forman ensamblajes interfaciales que pueden pasar activamente entre estados rígidos y móviles en la interfaz aire-líquido de las películas. Estos hallazgos subrayan la relación intrincada entre las propiedades interfaciales y la estabilidad de la espuma, demostrando que estos complejos de proteínas mejoran significativamente tanto las propiedades interfaciales como las reológicas de las espumas, aumentando su resistencia a la ruptura y la coalescencia. En el contexto de las harinas instantáneas, esta tecnología podría aprovecharse para desarrollar productos con espumas más duraderas y estables. La incorporación de proteínas vegetales, como las proteínas de colza y arroz, podría mejorar sustancialmente la estabilidad de las espumas. Las proteínas de colza podrían mejorar la cobertura en la interfaz aire-agua, mientras que las proteínas de arroz, combinadas con iones metálicos y poliglicósidos, podrían reforzar la estabilidad de la espuma contra la ruptura y la coalescencia. Este enfoque podría mejorar la calidad de los alimentos instantáneos, especialmente en aplicaciones donde la formación y estabilidad de la espuma son críticas.

En la red temática de este período (Figura 7b, 7c), la centralidad y densidad siguen siendo consideraciones clave. Es particularmente destacable la prominencia de la palabra "Proteína" como un tema altamente desarrollado, lo que resalta su importancia en la producción de alimentos instantáneos. Las proteínas juegan un papel fundamental en los sistemas multifásicos, influyendo directamente en las propiedades emulsionantes y espumantes, así como en la estabilidad de emulsiones o espumas [71]. Está bien establecido que las capas de adsorción de proteínas pueden alterarse considerablemente por diversos factores, incluidas las interacciones con surfactantes, fosfolípidos (Figura 7c), partículas, otras proteínas y polisacáridos. Específicamente, la presencia de polisacáridos puede estabilizar o desestabilizar la capa de adsorción de proteínas, lo que impacta en el sistema global [72]. Esta interacción compleja resalta la importancia de comprender las interacciones entre las proteínas y otros componentes en los sistemas multifásicos, especialmente en el contexto de la producción de alimentos instantáneos.

4. Conclusiones

El estudio realizado mediante el software SciMAT y análisis bibliométrico ha arrojado luz sobre diversas metodologías empleadas para caracterizar las propiedades interfaciales y sus aplicaciones en la industria alimentaria. Al centrarse en factores como el número de publicaciones, revistas y autores, el estudio ha destacado los temas más relevantes, palabras clave, su co-ocurrencia y agrupamiento, proporcionando una visión detallada sobre el proceso de desarrollo y las dinámicas de investigación en este campo.

En general, los hallazgos sugieren una correlación entre diferentes metodologías que contribuyen a comprender el comportamiento de los materiales bajo condiciones específicas, considerando factores como la composición de la fase interfacial, las condiciones operativas, la estructura, la estabilidad, la reología interfacial, la difusión molecular y la velocidad de formación de películas, todos los cuales influyen en las características interfaciales. El estudio resalta la importancia de investigar las interacciones entre componentes en sistemas multifásicos como un enfoque prioritario de investigación en este ámbito.

A partir de artículos recientes, es evidente que el comportamiento de los emulsionantes alimentarios en interfaces fluidas sigue siendo un tema de creciente interés entre los investigadores. Este interés surge de la necesidad de comprender la importancia de la estabilidad en los sistemas alimentarios multifásicos, garantizando la calidad y seguridad del producto, al tiempo que se exploran diversas estrategias para mejorar su funcionalidad. Estos esfuerzos buscan ampliar las aplicaciones de sistemas multifásicos derivados de harinas en la industria alimentaria, mejorando tanto los productos como la experiencia de los consumidores.

Fondos: Esta investigación fue financiada por el proyecto de Jóvenes Investigadores e Innovadores en el Departamento del Cauca y el proyecto de Quinoa (SGR) BPIN 2020000100052 con ID 5637 de la Universidad del Cauca.

Agradecimientos: Agradecemos al Dr. José Solanilla su orientación y apoyo como miembro de nuestro grupo asesor/supervisor. La joven investigadora Yesika López Fuertes, agradece al Grupo de Investigación en Ingeniería de Producto y Procesos Agroindustriales GIPA y su director y tutor José Fernando Solanilla Duque, al proyecto de Jóvenes Investigadores e Innovadores en el Departamento del Cauca y a los doctores Ph. Diego Fernando Roa Acosta y Ph. Jhon Édison Nieto Calvache, por sus aportes en el desarrollo de esta revisión.

Referencias

- [1] Q. Li, Z. Wan, y X. Yang, "Glycyrrhizic acid: self-assembly and applications in multiphase food systems", *Curr. Opin. Food Sci.*, vol. 43, pp. 107–113, feb. 2022, doi: 10.1016/J.COFS.2021.11.008.
- [2] M. Xu, Z. Wan, y X. Yang, "Recent Advances and Applications of Plant-Based Bioactive Saponins in Colloidal Multiphase Food Systems", *Mol.* 2021, Vol. 26, Page 6075, vol. 26, núm. 19, p. 6075, oct. 2021, doi: 10.3390/MOLECULES26196075.
- [3] S. Lam, K. P. Velikov, y O. D. Velev, "Pickering stabilization of foams and emulsions with particles of biological origin", *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, vol. 19, núm. 5, pp. 490–500, oct. 2014, doi: 10.1016/J.COCIS.2014.07.003.
- [4] L. M. Sagis y J. Yang, "Protein-stabilized interfaces in multiphase food: comparing structure-function relations of plant-based and animal-based proteins", *Curr. Opin. Food Sci.*, vol. 43, pp. 53–60, feb. 2022, doi: 10.1016/J.COFS.2021.11.003.
- [5] J. M. Conde y J. M. Rodríguez Patino, "The effect of enzymatic treatment of a sunflower protein isolate on the rate of adsorption at the air–water interface", *J. Food Eng.*, vol. 78, núm. 3, pp. 1001–1009, feb. 2007, doi: 10.1016/J.JFOODENG.2005.12.013.
- [6] V. Ortiz-Gómez, J. E. Nieto-Calvache, D. F. Roa-Acosta, J. F. Solanilla-Duque, y J. E. Bravo-Gómez, "Preliminary Characterization of Structural and Rheological Behavior of the Quinoa Hyperprotein-Defatted Flour", *Front. Sustain. Food Syst.*, vol. 6, p. 160, may 2022, doi: 10.3389/FSUFS.2022.852332/BIBTEX.
- [7] B. Z. Yuan y J. Sun, "Bibliometric analysis of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) research publications based on Web of Science", *Food Sci. Technol.*, vol. 42, p. e96321, dic. 2021, doi: 10.1590/FST.96321.
- [8] S. 'ed H. Zyoud, M. Shakhshir, A. S. Abushanab, A. Koni, M. Hamdallah, y S. W. Al-Jabi, "Mapping the knowledge structure of a gluten-free diet: a global perspective", *Transl. Med. Commun.* 2023 81, vol. 8, núm. 1, pp. 1–12, sep. 2023, doi: 10.1186/S41231-023-00152-W.
- [9] A. W. Harzing y S. Alakangas, "Google Scholar, Scopus and the Web of Science: a longitudinal and cross-disciplinary comparison", *Scientometrics*, vol. 106, núm. 2, pp. 787–804, feb. 2016, doi: 10.1007/S11192-015-1798-9/TABLES/4.
- [10] D. H. Flórez-Martínez, C. A. Contreras-Pedraza, y J. Rodríguez, "A systematic analysis of non-centrifugal sugar cane processing: Research and new trends", *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 107, pp. 415–428, ene. 2021, doi: 10.1016/J.TIFS.2020.11.011.
- [11] X. Ma, H. Luo, F. Zhang, y F. Gao, "A bibliometric and visual analysis of fruit quality detection research", *Food Sci. Technol.*, vol. 42, p. e72322, sep. 2022, doi: 10.1590/FST.72322.
- [12] E. Solano López, S. J. Castellanos Quintero, M. Magdalena López Rodríguez del Rey, y J. I. Hernández Fernández, "La bibliometría: una herramienta eficaz para evaluar la actividad científica postgraduada", *MediSur*, vol. 7, núm. 4, pp. 59–62, 2009, Consultado: el 27 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-897X2009000400011&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [13] F. Okumus, M. A. Köseoglu, E. D. Putra, I. C. Dogan, y M. Yildiz, "A Bibliometric Analysis of Lodging-Context Research From 1990 to 2016", *J. Hosp. Tour. Res.*, vol. 43, núm. 2, pp. 210–225, feb. 2019, doi: 10.1177/1096348018765321.
- [14] M. J. Cobo, A. G. López-Herrera, E. Herrera-Viedma, y F. Herrera, "An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field", *J. Informetr.*, vol. 5, núm. 1, pp. 146–166, ene. 2011, doi: 10.1016/J.JOI.2010.10.002.
- [15] X. Cao *et al.*, "Knowledge Mapping of Dietary Factors of Metabolic Syndrome Research: Hotspots, Knowledge Structure, and Theme Trends", *Front. Nutr.*, vol. 8, p. 295, may 2021, doi: 10.3389/FNUT.2021.655533/BIBTEX.
- [16] K. P. Das y J. E. Kinsella, "Stability Of Food Emulsions: Physicochemical Role Of Protein And Nonprotein Emulsifiers", *Adv. Food Nutr. Res.*, vol. 34, núm. C, pp. 81–201, ene. 1990, doi: 10.1016/S1043-4526(08)60007-8.
- [17] M. A. Bos y T. Van Vliet, "Interfacial rheological properties of adsorbed protein layers and surfactants: a review", *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 91, núm. 3, pp. 437–471, jul. 2001, doi: 10.1016/S0001-8686(00)00077-4.
- [18] V. N. Izmailova y G. P. Yampolskaya, "Rheological parameters of protein interfacial layers as a criterion of the transition from stable emulsions to microemulsions", *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 88, núm. 1–2, pp. 99–128, dic. 2000, doi: 10.1016/S0001-8686(00)00042-7.
- [19] A. R. Mackie, A. P. Gunning, M. J. Ridout, P. J. Wilde, y J. R. Patino, "In situ measurement of the displacement of protein films from the air/water interface by surfactant", *Biomacromolecules*, vol. 2, núm. 3, pp. 1001–1006, 2001, doi: 10.1021/BM015540I.
- [20] J. M. Rodríguez Patino, J. M. Navarro García, y M. R. Rodríguez Nio, "Protein-lipid interactions at the oil-water interface", *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 21, núm. 1–3, pp. 207–216, 2001, doi: 10.1016/S0927-7765(01)00173-4.
- [21] G. Gürbüz, V. Kauntola, J. M. Ramos Diaz, K. Jouppila, y M. Heinonen, "Oxidative and physical stability of oil-in-water emulsions prepared with quinoa and amaranth proteins", *Eur. Food Res. Technol.*, vol. 244, núm. 3, pp. 469–479, mar. 2018, doi: 10.1007/S00217-017-2973-4/FIGURES/4.
- [22] J. M. Rodríguez Patino y M. R. Rodríguez Niño, "Interfacial characteristics of food emulsifiers (proteins and lipids) at the air-water interface", *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 15, núm. 3–4, pp. 235–252, oct. 1999, doi: 10.1016/S0927-7757(99)00012-6.
- [23] M. J. Reeve y P. Sherman, "The interaction of modified 7S soy protein with mono- and di-glycerides at the oil-water interface

- and its effect on the stability of concentrated corn oil-in-water emulsions", *Colloid Polym. Sci.*, vol. 266, núm. 10, pp. 930–936, oct. 1988, doi: 10.1007/BF01410849/METRICS.
- [24] J. Holstborg, B. V. Pedersen, N. Krog, y S. K. Olesen, "Physical properties of diglycerol esters in relation to rheology and stability of protein-stabilised emulsions", *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 12, núm. 3–6, pp. 383–390, ene. 1999, doi: 10.1016/S0927-7765(98)00092-7.
- [25] J. P. Krause, R. Wüstneck, A. Seifert, y K. D. Schwenke, "Stress-relaxation behaviour of spread films and coalescence stability of o/w emulsions formed by succinylated legumin from faba beans (*Vicia faba* L.)", *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 10, núm. 3, pp. 119–126, feb. 1998, doi: 10.1016/S0927-7765(97)00026-X.
- [26] E. Dickinson, M. G. Semenova, A. S. Antipova, y E. G. Pelan, "Effect of high-methoxy pectin on properties of casein-stabilized emulsions", *Food Hydrocoll.*, vol. 12, núm. 4, pp. 425–432, oct. 1998, doi: 10.1016/S0268-005X(98)00057-5.
- [27] F. Bourry, T. Ivanova, I. Panaïotov, y J. E. Proust, "Dilatational Properties of Poly(D,L-lactic acid) and Bovine Serum Albumin Monolayers Spread at the Air/Water Interface", *Langmuir*, vol. 11, núm. 2, pp. 599–606, 1995, doi: 10.1021/LA00002A040/ASSET/LA00002A040.FP.PNG_V03.
- [28] L. A. Lobo y D. T. Wasan, "Thin film stability and interfacial rheology of emulsion systems", *AIChE Symp. Ser.*, vol. 86, núm. 277, pp. 25–34, 1990.
- [29] M. P. T. and C. S. A.N. Calzetta Resio, "Some physical and thermal characteristics of amaranth starch", pp. 371–378, 1996.
- [30] R. Miller, R. Wüstneck, J. Krägel, y G. Kretzschmar, "Dilational and shear rheology of adsorption layers at liquid interfaces", *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 111, núm. 1–2, pp. 75–118, jun. 1996, doi: 10.1016/0927-7757(95)03492-7.
- [31] P. J. Wilde, "Interfaces: their role in foam and emulsion behaviour", *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, vol. 5, núm. 3–4, pp. 176–181, jul. 2000, doi: 10.1016/S1359-0294(00)00056-X.
- [32] F. Tamm, S. Herbst, A. Brodkorb, y S. Drusch, "Functional properties of pea protein hydrolysates in emulsions and spray-dried microcapsules", *Food Hydrocoll.*, vol. 58, pp. 204–214, jul. 2016, doi: 10.1016/J.FOODHYD.2016.02.032.
- [33] A. H. Martin, K. Grolle, M. A. Bos, M. A. Cohen Stuart, y T. Van Vliet, "Network Forming Properties of Various Proteins Adsorbed at the Air/Water Interface in Relation to Foam Stability", *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 254, pp. 175–183, 2002, doi: 10.1006/jcis.2002.8592.
- [34] R. Borbás, B. S. Murray, y É. Kiss, "Interfacial shear rheological behaviour of proteins in three-phase partitioning systems", *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 213, núm. 1, pp. 93–103, feb. 2003, doi: 10.1016/S0927-7757(02)00358-8.
- [35] J. M. Rodríguez Patino, M. R. Rodríguez Niño, y C. Carrera Sánchez, "Structure, miscibility, and rheological characteristics of β -casein-monoglyceride mixed films at the air-water interface", *J. Agric. Food Chem.*, vol. 51, núm. 1, pp. 112–119, 2003, doi: 10.1021/jf020197+.
- [36] P. Erni, P. Fischer, E. J. Windhab, V. Kusnezov, H. Stettin, y J. Läger, "Stress- and strain-controlled measurements of interfacial shear viscosity and viscoelasticity at liquid/liquid and gas/liquid interfaces", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 74, núm. 11, pp. 4916–4924, 2003, doi: 10.1063/1.1614433.
- [37] C. Carrera Sánchez y J. M. Rodríguez Patino, "Surface shear rheology of WPI-monoglyceride mixed films spread at the air-water interface", *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 36, núm. 1, pp. 57–69, jul. 2004, doi: 10.1016/J.COLSURFB.2004.04.007.
- [38] N. P. K. Humblet-Hua, E. Van Der Linden, y L. M. C. Sagis, "Surface rheological properties of liquid-liquid interfaces stabilized by protein fibrillar aggregates and protein-polysaccharide complexes", *Soft Matter*, vol. 9, núm. 7, pp. 2154–2165, jul. 2013, doi: 10.1039/C2SM26627J.
- [39] G. G. Fuller y J. Vermant, "Complex Fluid-Fluid Interfaces: Rheology and Structure", <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-061010-114202>, vol. 3, pp. 519–543, jun. 2012, doi: 10.1146/ANNUREV-CHEMBIOENG-061010-114202.
- [40] A. Dan, G. Gochev, y R. Miller, "Tensiometry and dilational rheology of mixed β -lactoglobulin/ionic surfactant adsorption layers at water/air and water/hexane interfaces", *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 449, pp. 383–391, jul. 2015, doi: 10.1016/J.JCIS.2015.01.035.
- [41] A. Dan, R. Wüstneck, J. Krägel, E. V. Aksenenko, V. B. Fainerman, y R. Miller, "Adsorption and dilational rheology of mixed β -casein/DoTAB layers formed by sequential and simultaneous adsorption at the water/hexane interface", *Langmuir*, vol. 29, núm. 7, pp. 2233–2241, feb. 2013, doi: 10.1021/LA304664X/SUPPL_FILE/LA304664X_SI_001.PDF.
- [42] L. Seta, N. Baldino, D. Gabriele, F. R. Lupi, y B. de Cindio, "Rheology and adsorption behaviour of β -casein and β -lactoglobulin mixed layers at the sunflower oil/water interface", *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 441, pp. 669–677, ene. 2014, doi: 10.1016/J.COLSURFA.2013.10.041.
- [43] M. Lexis y N. Willenbacher, "Yield stress and elasticity of aqueous foams from protein and surfactant solutions – The role of continuous phase viscosity and interfacial properties", *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 459, pp. 177–185, oct. 2014, doi: 10.1016/J.COLSURFA.2014.06.030.
- [44] M. Lexis, "Einfluss der Flüssigkeitsviskosität auf das rheologische Verhalten von Schäumen ‡", núm. 8, pp. 1317–1323, 2013, doi: 10.1002/cite.201200128.
- [45] K. Engelhardt *et al.*, "pH Effects on the Molecular Structure of β - Lactoglobulin Modified Air – Water Interfaces and Its Impact on Foam Rheology", 2013.
- [46] M. Noshad, M. Mohebbi, F. Shahidi, y A. Koocheki, "Effect of layer-by-layer polyelectrolyte method on encapsulation of

- vanillin", *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 81, pp. 803–808, nov. 2015, doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2015.09.012.
- [47] A. R. Narváez y S. V. Vaidya, "Protein–surfactant interactions at the air-water interface", *Excip. Appl. Formul. Des. Drug Deliv.*, pp. 139–166, ene. 2015, doi: 10.1007/978-3-319-20206-8_6/COVER.
- [48] W. Li *et al.*, "Improvement of emulsifying properties of soy protein through selective hydrolysis: Interfacial shear rheology of adsorption layer", *Food Hydrocoll.*, vol. 60, pp. 453–460, oct. 2016, doi: 10.1016/J.FOODHYD.2016.04.019.
- [49] E. Dickinson, "Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems", *Food Hydrocoll.*, vol. 17, núm. 1, pp. 25–39, ene. 2003, doi: 10.1016/S0268-005X(01)00120-5.
- [50] A. Jaishankar y G. H. McKinley, "Power-law rheology in the bulk and at the interface: Quasi-properties and fractional constitutive equations", *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 469, núm. 2149, ene. 2013, doi: 10.1098/RSPA.2012.0284.
- [51] P. X. Qi, H. K. Chau, M. L. Fishman, E. D. Wickham, y A. T. Hotchkiss, "Investigation of molecular interactions between β -lactoglobulin and sugar beet pectin by multi-detection HPSEC", *Carbohydr. Polym.*, vol. 107, núm. 1, pp. 198–208, jul. 2014, doi: 10.1016/J.CARBPOL.2014.02.080.
- [52] L. Goibier, S. Lecomte, F. Leal-Calderon, y C. Faure, "The effect of surfactant crystallization on partial coalescence in O/W emulsions", *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 500, pp. 304–314, ago. 2017, doi: 10.1016/J.JCIS.2017.04.021.
- [53] A. Kasra Asghari, I. Norton, T. Mills, P. Sadd, y F. Spyropoulos, "Interfacial and foaming characterisation of mixed protein-starch particle systems for food-foam applications", 2015, doi: 10.1016/j.foodhyd.2015.09.007.
- [54] M. Laporte, A. Montillet, D. Della Valle, C. Loisel, y A. Riaublanc, "Characteristics of foams produced with viscous shear thinning fluids using microchannels at high throughput", 2015, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.10.032.
- [55] M. N. Corstens, L. A. Osorio Caltenco, R. de Vries, K. Schroën, y C. C. Berton-Carabin, "Interfacial behaviour of biopolymer multilayers: Influence of in vitro digestive conditions", *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 153, pp. 199–207, may 2017, doi: 10.1016/J.COLSURFB.2017.02.019.
- [56] D. N. López, V. Boeris, D. Spelzini, C. Bonifacino, L. A. Panizzolo, y C. Abirached, "Adsorption of chia proteins at interfaces: Kinetics of foam and emulsion formation and destabilization", *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 180, pp. 503–507, ago. 2019, doi: 10.1016/J.COLSURFB.2019.04.067.
- [57] M. Moussier, V. Bosc, C. Michon, V. Pistre, C. Chaudemanche, y D. Huc-Mathis, "Multi-scale understanding of the effects of the solvent and process on whey protein emulsifying properties: Application to dairy emulsion", *Food Hydrocoll.*, vol. 87, pp. 869–879, feb. 2019, doi: 10.1016/J.FOODHYD.2018.08.052.
- [58] N. Yang *et al.*, "Interfacial behaviour of β -lactoglobulin aggregates at the oil–water interface studied using particle tracking and dilatational rheology", *Soft Matter*, vol. 17, núm. 10, pp. 2973–2984, mar. 2021, doi: 10.1039/D0SM01761B.
- [59] A. Kezwoń y K. Wojciechowski, "Collagen-surfactant mixtures at fluid/fluid interfaces", *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 509, pp. 390–400, nov. 2016, doi: 10.1016/J.COLSURFA.2016.09.040.
- [60] J. Hu *et al.*, "Comparative study on foaming and emulsifying properties of different beta-lactoglobulin aggregates", *Food Funct.*, vol. 10, núm. 9, pp. 5922–5930, 2019, doi: 10.1039/c9fo00940j.
- [61] M. Felix, A. Romero, C. Carrera-Sanchez, y A. Guerrero, "Assessment of interfacial viscoelastic properties of Faba bean (Vicia faba) protein-adsorbed O/W layers as a function of pH", *Food Hydrocoll.*, vol. 90, pp. 353–359, may 2019, doi: 10.1016/J.FOODHYD.2018.12.036.
- [62] R. Zhang, Y. Liu, X. Huang, M. Xu, R. Liu, y W. Zong, "Interaction of a digestive protease, Candida rugosa lipase, with three surfactants investigated by spectroscopy, molecular docking and enzyme activity assay", *Sci. Total Environ.*, vol. 622–623, pp. 306–315, may 2018, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2017.11.305.
- [63] R. Marsiglia, L. Mielles-Gómez, S. Lastra, S. E. Quintana, y L. A. García-Zapateiro, "Bromatological composition and effect of temperature on the rheology of eggplant pulp", *Ital. J. Food Sci.*, vol. 32, núm. 3, pp. 596–604, 2020, doi: 10.14674/IJFS-1706.
- [64] S. E. Quintana, J. M. Franco, y L. Garcia-Zapateiro, "PHYSICO-CHEMICAL AND BROMATOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ARENCA AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF OIL-IN-WATER EMULSIONS CONTAINING ISOLATED PROTEIN", *Ciência e Agrotecnologia*, vol. 39, núm. 6, pp. 634–641, nov. 2015, doi: 10.1590/S1413-70542015000600010.
- [65] V. Kontogiorgos y S. Prakash, "Adsorption kinetics and dilatational rheology of plant protein concentrates at the air- and oil-water interfaces", *Food Hydrocoll.*, vol. 138, p. 108486, may 2023, doi: 10.1016/J.FOODHYD.2023.108486.
- [66] S. Yan *et al.*, "Emulsions co-stabilized by soy protein nanoparticles and tea saponin: Physical stability, rheological properties, oxidative stability, and lipid digestion", *Food Chem.*, vol. 387, p. 132891, sep. 2022, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2022.132891.
- [67] F. A. Silva, P. A. Oyarzún, F. A. Silva, y P. A. Oyarzún, "Una visión actualizada sobre la síntesis, escalado y aplicaciones de las nanoemulsiones dobles", *Entre Cienc. e Ing.*, vol. 15, núm. 30, pp. 30–40, dic. 2021, doi: 10.31908/19098367.2095.
- [68] T. Wang, F. Li, H. Zhang, W. Feng, y R. Wang, "Plant-based high internal phase emulsions stabilized by dual protein nanostructures with heat and freeze–thaw tolerance", *Food Chem.*, vol. 373, p. 131458, mar. 2022, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2021.131458.
- [69] J. Yang, C. C. Berton-Carabin, C. V. Nikiforidis, E. van der Linden, y L. M. C. Sagis, "Competition of rapeseed proteins and oleosomes for the air-water interface and its effect on the foaming properties of protein-oleosome mixtures", *Food Hydrocoll.*, vol. 122, p. 107078, ene. 2022, doi: 10.1016/J.FOODHYD.2021.107078.

- [70] X. Yu *et al.*, "Interfacial and rheological properties of long-lived foams stabilized by rice proteins complexed to transition metal ions in the presence of alkyl polyglycoside", *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 630, pp. 645–657, ene. 2023, doi: 10.1016/J.JCIS.2022.10.126.
- [71] S. Caetano da Silva Lannes y J. Natali Miquelim, "Interfacial Behavior of Food Proteins", *Curr. Nutr. Food Sci.*, vol. 9, núm. 1, pp. 10–14, ene. 2013, doi: 10.2174/1573401311309010004.
- [72] P. Fischer, "Rheology of interfacial protein-polysaccharide composites", *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2013 2221, vol. 222, núm. 1, pp. 73–81, jun. 2013, doi: 10.1140/EPJST/E2013-01827-X.