

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

ESCUELA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

**El proceso de esferificación: Un enfoque científico para la
transformación culinaria**

Monografía previa a la obtención del título de Biólogo

MARTÍN SEBASTIÁN MORA ERAZO

Quito, 2023

Certifico que la Monografía de la Carrera de Biología, del Sr. Martín Sebastián Mora Erazo ha sido concluida de conformidad con las normas establecidas; por lo tanto, puede ser presentada para la calificación correspondiente.

Patricia Portero Barahona
Directora de la Monografía
Quito, 15 de diciembre de 2023

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la incansable búsqueda de nuevos horizontes en el campo de la investigación. Que este estudio sirva como un puente entre la ciencia y la gastronomía, abriendo caminos para exploraciones futuras donde la curiosidad y el conocimiento se entrelazan. A Dios, fuente de toda sabiduría; a mi familia, por su amor y apoyo inquebrantables; a mis profesores y mentores, por guiarme con su sabiduría y experiencia; y a mis colegas y amigos, por su constante estímulo e inspiración. Este esfuerzo es un homenaje a todos aquellos que creen en el poder transformador de la educación, y que se esfuerzan por derribar barreras para descubrir nuevas verdades y soluciones. Que este trabajo suscite en otros el espíritu de seguir explorando, aprendiendo y generando ciencia.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	III
TABLA DE CONTENIDOS	IV
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABLAS	VII
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. GASTRONOMÍA MOLECULAR	7
2.1.1. DEFINICIÓN DE LA GASTRONOMÍA Y SU RELEVANCIA CULTURAL	7
2.1.2. SURGIMIENTO Y EVOLUCIÓN DE LA GASTRONOMÍA MOLECULAR	9
2.1.3. TÉCNICAS DESTACADAS EN GASTRONOMÍA MOLECULAR	11
2.1.3.1. GELIFICACIÓN	11
2.1.3.2. ESFERIFICACIÓN	12
2.1.3.3. ESPUMIFICACIÓN.....	12
2.1.3.4. EMULSIFICACIÓN	13
2.2. ESFERIFICACIÓN: UNA APROXIMACIÓN A LA TÉCNICA	14
2.2.1. FUNDAMENTOS Y DESARROLLO HISTÓRICO	14
2.2.2. TIPOS DE ESFERIFICACIÓN Y SUS APLICACIONES CULINARIAS	16
2.2.2.1. ESFERIFICACIÓN DIRECTA.....	16
2.2.2.2. ESFERIFICACIÓN INVERSA.....	18
2.3. BASES BIOQUÍMICAS DE LA ESFERIFICACIÓN	20
2.3.1. ALGINATO	20
2.3.2. ESTRUCTURA MOLECULAR DEL ALGINATO	22
2.3.3. PROCESOS FÍSICOQUÍMICOS INVOLUCRADOS EN LA ESFERIFICACIÓN	25
2.3.4. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y SENSORIAL DE ESFERAS DE ALGINATO.....	28
2.4. FACTORES CRÍTICOS EN EL PROCESO DE ESFERIFICACIÓN	31
2.4.1. PESO MOLECULAR DEL ALGINATO	31
2.4.2. CONCENTRACIÓN DE ALGINATO	32
2.4.3. CONCENTRACIÓN DE IONES DE CALCIO	34
2.4.4. DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE RESIDENCIA	36
2.4.5. VELOCIDAD DE CIZALLAMIENTO.....	38
2.4.6. TEMPERATURA	39
2.4.7. FUERZA IÓNICA	41
2.4.8. pH.....	42
2.5. POTENCIAL INDUSTRIAL DE LA ESFERIFICACIÓN EN GASTRONOMÍA MOLECULAR	47
2.5.1. EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE APLICAR TÉCNICAS DE ESFERIFICACIÓN A GRAN ESCALA	47
2.5.1.1. MATERIA PRIMA	47
2.5.1.2. PRODUCCIÓN	48
2.5.1.3. ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO.....	51
3. CONCLUSIONES	54

REFERENCIAS56

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Características estructurales del alginato. M: residuo de manuronato; G: residuo de guluronato.....</i>	22
<i>Figura 2. Formación de enlaces en la reacción del cloruro de calcio con alginato de sodio .</i>	26
<i>Figura 3. Uniones en egg-box del ion calcio y el bloque G del alginato.</i>	27

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones óptimas en el proceso de esferificación44

RESUMEN

La gastronomía molecular, como fusión de ciencia y cocina, utiliza conocimientos fisicoquímicos para transformar texturas y sabores, desafiando las convenciones culinarias. La esferificación es una técnica que implica la creación de esferas gelatinosas a través de la reacción entre sodio y calcio. El presente trabajo pone énfasis en el posicionamiento de la técnica de esferificación como un referente de vanguardia tanto en el ámbito científico como en el culinario. Además, se exploran las bases bioquímicas del alginato de sodio, componentes clave para la esferificación, evaluando su impacto en la gastronomía molecular. El objetivo principal de este trabajo es analizar los procesos bioquímicos involucrados en la esferificación, aplicando un enfoque científico para optimizar su uso en la industria alimentaria. El estudio destaca la importancia de variables críticas en el proceso de esferificación, tales como la temperatura, el pH, y la concentración de reactivos, además de factores como el peso molecular del alginato y la concentración de calcio. Estas variables no solo son esenciales para establecer estándares experimentales para la aplicación efectiva de la esferificación en una variedad de ingredientes y preparaciones culinarias, sino que también son determinantes en la apertura de nuevas posibilidades para la innovación en la gastronomía molecular. Finalmente, se resalta la importancia y el potencial de la esferificación a nivel industrial, analizando tres aspectos fundamentales para su aplicabilidad que incluyen la obtención de la materia prima, los procesos de producción y su viabilidad económica.

Palabras clave: esferificación, gastronomía molecular, alginato, técnicas culinarias, innovación alimentaria.

ABSTRACT

Molecular gastronomy, as a fusion of science and cooking, employs physicochemical knowledge to transform textures and flavors, challenging culinary conventions. Spherification is a technique involving the creation of gelatinous spheres through the reaction between sodium and calcium. This work emphasizes the positioning of the spherification technique as a cutting-edge reference in both scientific and culinary realms. Additionally, it explores the biochemical foundations of sodium alginate, key components for spherification, evaluating their impact in molecular gastronomy. The main objective of this study is to analyze the biochemical processes involved in spherification, applying a scientific approach to optimize its use in the food industry. The study highlights the importance of critical variables in the spherification process, such as temperature, pH, and the concentration of reactants, along with factors like the molecular weight of alginate and the concentration of calcium. These variables are not only essential for establishing experimental standards for the effective application of spherification in a variety of culinary ingredients and preparations but also pivotal in opening new possibilities for innovation in molecular gastronomy. Finally, the importance and potential of spherification at the industrial level are underscored, analyzing three fundamental aspects for its applicability, namely, the sourcing of raw materials, production processes, and economic viability.

Keywords: spherification, molecular gastronomy, alginate, culinary techniques, food innovation.

1. INTRODUCCIÓN

La gastronomía explora la relación entre la alimentación y las manifestaciones culturales. Este campo aborda tanto los procesos de elaboración y presentación de alimentos comestibles de alta calidad y sabor, así como la caracterización de las tradiciones culinarias específicas de diversas regiones geográficas (Ferguson, 2004). Además, la gastronomía engloba el conocimiento sobre la optimización de la nutrición y la promoción de una alimentación saludable desde una perspectiva científica, destacando su naturaleza dinámica y en constante evolución a nivel mundial. En la gastronomía, la innovación es un distintivo clave diferenciador en el mercado de alimentos (Hall & Gößling, 2013). La reformulación de los procesos productivos tradicionales de los alimentos busca productos nuevos o mejoras a los productos ya existentes. Para ello, las actividades tecnológicas que implican el conocimiento científico, experimentación práctica y una combinación de las tecnologías existentes es fundamental (Vega & Ubbink, 2008).

La gastronomía molecular consiste en un enfoque científico de la cocina, el cual se fundamenta en la comprensión rigurosa de los procesos fisicoquímicos que tienen lugar durante la preparación de alimentos. Al explorar dichas transformaciones fisicoquímicas que acontecen durante el proceso culinario, los cocineros son capaces de aplicar técnicas científicamente fundamentadas para crear nuevas texturas y sabores a partir de ingredientes básicos (This, 2008). Es así como esta disciplina ha dado origen a una serie de técnicas innovadoras que cuestionan las convenciones culinarias y permiten la exploración de nuevos horizontes en la cocina.

En el mundo innovador de la cocina contemporánea, la gastronomía molecular desempeña un papel esencial al permitir a los cocineros experimentar con la ciencia para crear experiencias culinarias únicas. La gastronomía molecular así permite explorar y experimentar texturas, sabores y presentaciones de los alimentos para la creación de nuevos platos. Entre las técnicas más destacadas se encuentran la esferificación, gelificación, espumificación y emulsificación (Schmid & McGee, 1989).

De entre estas técnicas, la esferificación se destaca por su capacidad de transformar líquidos en esferas gelatinosas, ofreciendo una experiencia sensorial única. Originada en los años 50 (Peschardt, 1942; This, 2006, 2008) y popularizada por Adrià en el siglo XXI, esta técnica ha sido un hito en la culinaria moderna (Adrià et al., 2010; Adrià & elBullifoundation, 2021). La esferificación directa e inversa son sus dos variantes principales, cada una con sus particularidades y aplicaciones específicas. Su fundamento radica en la reacción del alginato de sodio con iones de calcio, creando una membrana gelatinosa que encapsula un líquido. Esta técnica no solo ha enriquecido la experiencia gastronómica, sino que también ha contribuido al entendimiento científico de los procesos de gelificación (Augst et al., 2006).

La aplicación de la esferificación, sin embargo, va más allá de los restaurantes de alta cocina. Su potencial para la industrialización abre nuevas posibilidades para la producción en masa de alimentos con características innovadoras (Silva, 2023). La transición de la esferificación a un entorno industrial plantea desafíos únicos, incluyendo la estandarización de

procesos, el manejo eficiente de ingredientes a gran escala, y el cumplimiento de estrictas normativas de seguridad alimentaria.

En este contexto, la selección de materias primas y proveedores, el control riguroso de calidad, y la implementación de tecnologías avanzadas son fundamentales para garantizar la consistencia y calidad del producto final (Singh & Bagade, 2022). Estos aspectos, combinados con una cuidadosa gestión de los recursos y una continua innovación en los procesos de producción, son esenciales para la viabilidad económica y sostenibilidad ambiental de la esferificación a gran escala.

El impacto económico y ambiental de la esferificación en la industria alimentaria es significativo. La demanda creciente de productos innovadores y experiencias culinarias únicas presenta oportunidades lucrativas para las empresas que adopten estas técnicas. Sin embargo, es crucial abordar los aspectos de sostenibilidad y responsabilidad medioambiental, desde la selección de ingredientes hasta el embalaje y la distribución de los productos (Ivanovic, 2011).

Mirando hacia el futuro, la esferificación en la gastronomía molecular no solo representa una técnica culinaria avanzada, sino también una ventana a nuevas posibilidades en la ciencia de los alimentos y la producción industrial. Su capacidad para fusionar sabor, arte y ciencia la convierte en una herramienta poderosa para la innovación continua y la creación de experiencias gastronómicas excepcionales (Blumenthal, 2009; Bubin et al., 2019; Lee & Rogers, 2012).

Este estudio busca profundizar en la comprensión de la esferificación, desde sus bases teóricas hasta su aplicación práctica y potencial industrial. A través de un análisis detallado, se explorará cómo esta técnica ha revolucionado la cocina moderna, los desafíos que implica su implementación a gran escala y las perspectivas para su futuro en la gastronomía y la industria alimentaria.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar la técnica de esferificación con un enfoque científico para la transformación culinaria.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Entender los procesos fisicoquímicos involucrados en los procesos de esferificación.
- Evaluar las variantes de esferificación en términos de practicidad y aplicabilidad en la cocina.
- Determinar los factores y condiciones óptimas en los procesos de esferificación
- Explorar el potencial de las técnicas de esferificación para uso en la producción alimentaria a gran escala.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. GASTRONOMÍA MOLECULAR

2.1.1. DEFINICIÓN DE LA GASTRONOMÍA Y SU RELEVANCIA CULTURAL

En la actualidad, la gastronomía fusiona la ciencia, el arte culinario y la cultura emergiendo como un ámbito de gran relevancia ya que conlleva la preparación, presentación y significado cultural de los alimentos. La etimología del término "gastronomía" proviene de las palabras griegas *gaster* (estómago) y *nomos* (ley), lo que se traduce en la "ley del estómago". Originalmente, la gastronomía implicaba la preparación y el consumo de alimentos con un enfoque en la calidad y sabor, además del refinamiento en la elaboración culinaria (Bessièrre, 1998). Sin embargo, a lo largo de la historia esta disciplina ha evolucionado significativamente trascendiendo a la satisfacción de necesidades nutricionales básicas y emergiendo como un pilar fundamental de la cultura y la sociedad (Ferguson, 2004).

La gastronomía desempeña un papel excepcional en la preservación y transmisión de la identidad cultural. Los platos icónicos, las técnicas culinarias regionales y los rituales asociados con la comida sirven como reflejo de las tradiciones, valores y modos de vida de una comunidad. Estas manifestaciones culturales no solo definen la identidad, sino que también funcionan como un vínculo generacional, transmitiéndose de padres a hijos y asegurando la continuidad de la herencia culinaria (Hall & Gößling, 2013).

La influencia de la gastronomía se extiende más allá de la esfera cultural, dejando una huella en la economía, el turismo y la política. La industria alimentaria, incluyendo restaurantes y servicios relacionados, constituye una parte significativa de la economía en muchas regiones y países (C. M. Hall, 2006). El aumento en la popularidad de la comida étnica y local ha impulsado la industria del turismo, atrayendo a viajeros de todo el mundo a la exploración de platos y experiencias culinarias únicas. Además, las políticas alimentarias y las regulaciones de comercio internacional son impactadas por consideraciones gastronómicas y culturales, lo que evidencia la influencia de la gastronomía en la esfera política (Ferguson, 2004; Nestle, 2007).

Investigaciones científicas han revelado la interconexión entre las elecciones alimentarias y la salud. Las dietas ricas en nutrientes y basadas en la selección de ingredientes saludables se han asociado con una menor incidencia de enfermedades crónicas (Berkowitz et al., 2018). Por lo tanto, la gastronomía es una herramienta efectiva en la promoción de estos patrones de alimentación saludable (Bryce et al., 2017). Su contribución no se limita a la satisfacción de los sentidos, sino que abarca un ámbito más amplio incluyendo la promoción de dietas equilibradas y la prevención de enfermedades relacionadas con la alimentación (Berkowitz, Delahanty, et al., 2018).

En conclusión, la gastronomía representa mucho más que el arte de la buena comida; es una amalgama de ciencia, cultura y arte culinario que desempeña un papel esencial en nuestra sociedad.

2.1.2. SURGIMIENTO Y EVOLUCIÓN DE LA GASTRONOMÍA MOLECULAR

El surgimiento y evolución de la gastronomía molecular representa un hito paradigmático en la culinaria contemporánea, subrayando la manifestación de la ciencia y la creatividad en la preparación de alimentos (Vilgis, 2015). El punto de partida para comprender la gastronomía molecular radica en la ciencia que la sustenta. A mediados del siglo XX, pioneros como Hervé This y Nicholas Kurti sentaron las bases al reconocer que la comprensión de los procesos fisicoquímicos que intervienen en la preparación de alimentos permitiría la manipulación controlada de los mismos (This, 2008). Esta perspicaz observación condujo a la percepción de que la gastronomía no solo se basa en la tradición y el arte, sino también en la rigurosidad científica (Vega & Ubbink, 2008).

Una de las primeras contribuciones de la ciencia a la gastronomía fue la elucidación de las reacciones químicas que ocurren en la cocción de los alimentos. Conceptos como la desnaturalización de proteínas y la formación de Maillard se convirtieron en fundamentos clave para la comprensión de la transformación de ingredientes durante la cocción (Vega et al., 2013). Estos descubrimientos enriquecieron la capacidad de los cocineros para manipular texturas y sabores, y además dieron origen a técnicas culinarias que posteriormente se integrarían en la gastronomía molecular (Schmid & McGee, 1989).

A medida que la ciencia y la tecnología avanzaban, la gastronomía molecular se fue estableciendo como un campo independiente de estudio, diferenciándose de la cocina

convencional. Durante la década de 1990, el chef español Ferran Adrià, considerado uno de los exponentes más influyentes, impulsó el surgimiento de la gastronomía molecular a nivel global con su enfoque radical de su restaurante “elBulli” (Adrià et al., 2010). El uso de técnicas científicas, como la esferificación y la liofilización, para crear platos inusuales y provocativos, lo catapultó a la vanguardia del movimiento culinario (Barham et al., 2010).

El concepto de la "cocina de vanguardia" se convirtió en un estandarte de la gastronomía molecular. A través de la creatividad y la experimentación científica, los chefs se adentraron en un mundo de posibilidades previamente inexploradas (Petruzzelli & Savino, 2014). La influencia de la gastronomía molecular se hizo evidente en la transformación de platos tradicionales y en la aparición de nuevos ingredientes y técnicas. La comida ya no era simplemente una necesidad, sino una experiencia multisensorial que desafiaba las expectativas y trascendía la saciedad (Myhrvold et al., 2011).

El impacto global de la gastronomía molecular se refleja en su influencia tanto en la cocina de autor como en la industria alimentaria en general. Los restaurantes de alta cocina adoptaron técnicas y conceptos de la gastronomía molecular, elevando la experiencia gastronómica a un nivel completamente nuevo (McGee, 2012). Al mismo tiempo, la industria alimentaria reconoció el valor de la ciencia en la producción y mejora de alimentos, dando lugar a innovaciones en la presentación de productos (Blumenthal, 2009).

Además, la gastronomía molecular trascendió las fronteras culinarias, convirtiéndose en una disciplina educativa. Universidades y centros de investigación comenzaron a ofrecer programas académicos y cursos especializados que abordaban los aspectos científicos de la gastronomía (This, 2016). Este enfoque en la formación y la investigación científica ha contribuido a la continuación y evolución de la gastronomía molecular en todo el mundo.

2.1.3. TÉCNICAS DESTACADAS EN GASTRONOMÍA MOLECULAR

La gastronomía molecular se caracteriza por su enfoque científico y su capacidad para desafiar las convenciones culinarias tradicionales mediante la aplicación de técnicas innovadoras. Entre las técnicas más conocidas y utilizadas para conseguir la preparación de alimentos en la gastronomía molecular se incluyen: gelificación, esferificación, espumificación y emulsificación (Barham, 2003).

2.1.3.1. GELIFICACIÓN

La gelificación es una técnica culinaria que permite convertir líquidos en geles con una variedad de texturas y consistencias. A través de esta técnica, los cocineros pueden modificar la apariencia y la sensación en boca de los alimentos líquidos, abriendo nuevas dimensiones para la presentación de platos (Clark, 1996). La gelificación comprende las interacciones moleculares entre ingredientes como alginato, pectina, agar agar y gomas. Estos compuestos son capaces de formar redes moleculares que atrapan el líquido transformándolo en un gel con una textura específica (This, 2009). A través de la manipulación de factores como la concentración de los agentes gelificantes, la temperatura y el tiempo de gelificación, los cocineros pueden lograr

geles de diferente dureza, elasticidad y viscosidad. Esta técnica se ha aplicado a platos que van desde postres hasta platos salados, ofreciendo una amplia gama de posibilidades en la culinaria contemporánea (Barham et al., 2010).

2.1.3.2. ESFERIFICACIÓN

Otra técnica icónica en la gastronomía molecular y que ha sido ampliamente estudiada desde principios del siglo XX es la esferificación. Este método, basado en gelificación, ha tenido múltiples usos en la ciencia alimentaria al encapsular líquidos no gelificados en soluciones de biopolímeros iónicos. Su capacidad para envolver un líquido con una membrana delgada y transparente ha sido muy bien recibida por los consumidores, sirviendo de base para crear diversas formas culinarias como caviar, gnocchi, e incluso ravioli (Adrià et al., 2010; This, 2016). El proceso implica una fuerte creación de gel entre polisacáridos y un metal alcalinotérreo, principalmente calcio, cuyos efectos en la velocidad de gelificación han sido estudiados, hallándose que el cloruro de calcio genera una velocidad mayor que el gluconato de calcio (Blumenthal, 2009; Myhrvold et al., 2011).

2.1.3.3. ESPUMIFICACIÓN

La espumificación es otra técnica sobresaliente en la gastronomía molecular que se centra en la creación de espumas ligeras a partir de líquidos. Estas espumas aportan una dimensión adicional de delicadeza y textura a las preparaciones culinarias. La espumificación se apoya en la incorporación de aire a una matriz líquida, lo que da como resultado una espuma estable con propiedades viscosas y aireadas (This, 2008). Para lograr la espumificación, los

cocineros emplean ingredientes como lecitina, que actúa como emulsionante para estabilizar la espuma. Mediante técnicas que utilizan licuadoras de inmersión o sifones de espuma, se inyecta aire en la matriz líquida creando burbujas minúsculas que conforman la espuma. Esta técnica se ha aplicado a una amplia variedad de platos, desde sopas hasta postres, proporcionando una textura y un aspecto únicos que sorprenden al comensal (McGee, 2004).

2.1.3.4. EMULSIFICACIÓN

La emulsificación es una técnica que permite la combinación efectiva de ingredientes que bajo circunstancias convencionales no se mezclarían. Un ejemplo clásico es la combinación de aceite y agua que tienden a separarse en capas debido a sus diferencias de densidad. Sin embargo, mediante la emulsificación, los cocineros pueden lograr mezclas homogéneas de ingredientes que se rechazarían mutuamente (Adrià et al., 2010; This, 2016). Esta técnica se basa en la utilización de emulsionantes, como lecitina, que estabilizan las mezclas de ingredientes y evitan la separación. La emulsificación se ha aplicado en la creación de salsas, aderezos, y mayonesas, ampliando las posibilidades culinarias al permitir la fusión de sabores y texturas que antes eran difíciles de combinar (Dufresne & Meehan, 2017).

Si bien estas técnicas se han desarrollado en el ámbito de la gastronomía, también se han explorado oportunidades potenciales de aplicación industrial. La capacidad de transformar líquidos en geles, crear espumas ligeras y emulsionar ingredientes incompatibles podría tener aplicaciones en la producción de alimentos a gran escala (McGee, 2004). La investigación actual

se centra en evaluar la viabilidad y la eficiencia de estas técnicas en contextos industriales, lo que podría revolucionar la forma en que se producen y presentan los alimentos a nivel masivo.

2.2. ESFERIFICACIÓN: UNA APROXIMACIÓN A LA TÉCNICA

2.2.1. FUNDAMENTOS Y DESARROLLO HISTÓRICO

La esferificación, como su nombre sugiere, se basa en la formación controlada de pequeñas esferas de gel a partir de líquidos. El proceso involucra la reacción química entre el alginato de sodio y el calcio, que permite la creación de membranas de gel. Estas membranas encapsulan el líquido en su interior lo que resulta en esferas que se asemejan a perlas (Gibbs & Myhrvold, 2011; Lee & Rogers, 2012; This, 2009). La esferificación se sustenta en el entendimiento de las propiedades fisicoquímicas de los ingredientes y en la manipulación precisa de variables como el pH y la temperatura (Cao et al., 2020).

La historia de la esferificación es un relato intrigante que comienza con la búsqueda de la emulación visual y sensorial de perlas y caviar. Fue hace aproximadamente 70 años cuando William Peschardt, un químico británico, inventó esta técnica con la intención de crear esferas que se asemejaran a cerezas frescas (Cao et al., 2020). Sin embargo, su aplicación en la gastronomía molecular contemporánea es relativamente reciente. Una de las primeras aplicaciones exitosas de la esferificación fue la creación de “caviar” de melón cantalupo por Ferrán Adrià en “elBulli” en 2003 (Adrià et al., 2010). Esta preparación consiste en una membrana de alginato de calcio que envuelve pequeñas esferas de pulpa de melón (Adrià &

elBullifoundation, 2021). Esta innovación culinaria resultó en un éxito instantáneo, marcando un hito en la evolución de la técnica.

A medida que la esferificación se desarrollaba, los cocineros experimentadores refinaron y ampliaron la técnica. La modificación y adaptación continua permitió la aplicación de la esferificación a una variedad cada vez mayor de ingredientes (Köhn, 1975). En la actualidad, esta técnica se ha perfeccionado hasta tal punto que se utiliza para envolver una amplia gama de alimentos líquidos, transformándolos en esferas de tamaños uniformes (Phillips & Williams, 2009). Es por ello que, dada su prominencia en la gastronomía molecular, la esferificación mediante la utilización de alginato ha sido investigada en profundidad en el ámbito de la ciencia de los alimentos a nivel atómico, resaltando la necesidad de entender los procesos subyacentes en la esferificación y aprovechar su potencial en el contexto de la gastronomía molecular (Grant et al., 1973).

La esferificación trasciende los límites de la cocina y ha influido en la ciencia de los materiales y la tecnología alimentaria. Investigaciones previas han demostrado que el alginato es capaz de envolver una variedad de sustancias y alterar sus propiedades, lo que tiene implicaciones más allá del ámbito culinario (Luck, 2021). Por ejemplo, se ha informado que el alginato de sodio puede solubilizar y dispersar nanotubos de carbono en agua, lo que subraya su capacidad para envolver y transformar sustancias en diferentes contextos (Parreidt et al., 2018).

2.2.2. TIPOS DE ESFERIFICACIÓN Y SUS APLICACIONES CULINARIAS

La esferificación explota las propiedades de gelificación de los hidrocoloides como el alginato en presencia de iones de calcio permitiendo la conversión de soluciones líquidas en esferas gelatinosas con características organolépticas únicas. La esferificación se basa en dos variantes fundamentales: la esferificación directa y la inversa.

2.2.2.1. ESFERIFICACIÓN DIRECTA

La esferificación directa se destaca por ser un proceso relativamente sencillo. Conocida como "directa" debido a la inmediata interacción entre el alginato de sodio y los iones de calcio, esta técnica facilita la creación de esferas de gel al sumergir directamente una solución de sodio (alginato) en un baño de calcio (Sen, 2017). La simplicidad del proceso y la eficacia con la que se produce la gelificación son aspectos clave que han contribuido a la popularidad y la amplia aplicación de la esferificación directa en la gastronomía molecular. Al sumergir la solución de alginato en el baño de calcio se forma instantáneamente una membrana gelatinosa alrededor de la gota líquida, un fenómeno que resulta fundamental para entender la interacción entre los componentes bioquímicos (Del Pilar, 2019). Este proceso no solo encapsula el líquido en una forma estéticamente atractiva, sino que también altera su textura creando una experiencia sensorial única al degustar. La esferificación directa, por lo tanto, no es solo un método para transformar la presentación de los alimentos, sino también una herramienta para explorar las complejidades de la percepción sensorial en la gastronomía (Mushanganyisi et al., 2022).

El procedimiento comienza con la preparación de una solución de alginato de sodio. Este polisacárido es disuelto en el líquido que se desea esferificar formando una solución homogénea. La concentración del alginato en esta solución es un factor crítico, ya que afecta directamente la integridad y la textura de las esferas resultantes (García-Teneche & Novell, 2019). Una vez preparada la solución de alginato, se procede a su introducción en un baño que contiene iones de calcio, generalmente suministrados en forma de cloruro de calcio. Este paso se realiza con cuidado, depositando pequeñas cantidades de la solución de alginato en el baño de calcio para formar las esferas (Caporaso & Formisano, 2015). La técnica de introducción ya sea mediante jeringas, goteros o cucharas dosificadoras, actúa como un elemento crítico en la determinación del tamaño y la forma de las esferas.

Al entrar en contacto con el baño de calcio, ocurre una reacción de intercambio iónico en la que los iones de calcio se unen a los grupos carboxílicos del alginato (Serna-Gallén et al., 2022). Este proceso da lugar a la formación instantánea de una red polimérica de alginato de calcio en la periferia de cada gota, encapsulando así el líquido en su interior. La duración de la inmersión en el baño de calcio es fundamental, ya que un tiempo prolongado puede llevar a una gelificación completa de la esfera, perdiendo la cualidad líquida interna (Aguilera, 2018).

Desde una perspectiva científica y culinaria, la esferificación directa es adecuada para encapsular una variedad de sabores y texturas, tales como jugos y zumos frutales, extractos aromáticos y caldos intensos (Castells, 2021). Se utiliza ampliamente en la creación de caviar artificial y perlas de sabor, elementos que añaden una dimensión de sabor y textura concentrados

a los platos. Estas aplicaciones subrayan la capacidad de la técnica para transformar la presentación y enriquecer la experiencia sensorial de los alimentos (Silva, 2023).

Sin embargo, la esferificación directa tiene sus limitaciones. No es adecuada para soluciones que contienen altas concentraciones de calcio o que son muy ácidas, ya que estas condiciones pueden interferir con el proceso de gelificación y resultar en una formación de esfera defectuosa o inconsistente (Otilio, 2022). Además, la técnica puede no ser viable para soluciones con una viscosidad muy alta, ya que esto puede dificultar la formación de esferas y su liberación en el baño de calcio (Adrià et al., 2010). En estos casos, donde la esferificación directa no es viable o no produce resultados óptimos, la esferificación inversa se convierte en una alternativa preferible, abordando estas limitaciones y ofreciendo una mayor flexibilidad en la manipulación de una variedad más amplia de ingredientes y texturas.

2.2.2.2. ESFERIFICACIÓN INVERSA

La esferificación inversa ofrece una solución alternativa a los desafíos presentados por ciertos ingredientes en la esferificación directa. Esta técnica recibe el nombre de "inversa" debido a la transposición en el orden de reactivos comparado con el método directo; en lugar de sumergir una solución de alginato en un baño de calcio, se sumerge una solución rica en calcio en un baño de alginato de sodio (Tsai et al., 2017). Este cambio en la dinámica de reacción permite encapsular líquidos que de otro modo interferirían en el proceso de gelificación de la esferificación directa, como aquellos con alto contenido de calcio o acidez. Ejemplos de este tipo de soluciones son los jugos cítricos, productos lácteos, o licores (Bubin et al., 2019).

El procedimiento de la esferificación inversa comienza con la preparación de una solución que ya contiene iones de calcio, ya sea de forma natural o agregada. Esta solución se introduce luego en un baño de alginato de sodio (Escandell-Comesaña, 2021). Al contactar con el alginato, los iones de calcio reaccionan, formando una membrana de gel en la superficie externa de la gota. Sin embargo, si esta solución permanece en el baño de alginato por un tiempo prolongado, la membrana de gel continúa creciendo en espesor, pero este crecimiento ocurre principalmente hacia el exterior de la esfera (Tsai, Kitamura, et al., 2017). La difusión de los iones de calcio hacia el baño de alginato impulsa esta expansión, lo que puede llevar a una textura de gel más densa y posiblemente más firme en la membrana externa. Si se prolonga excesivamente, este proceso puede comprometer la calidad deseada de la esfera, afectando tanto su textura como la liberación del núcleo líquido.

Además, una variante importante de la esferificación inversa es la técnica de esferificación inversa congelada. Esta variante se utiliza cuando se desea encapsular un líquido con una textura más suave o cuando se trabaja con soluciones que tienen una tendencia a difundirse rápidamente en el baño de alginato (D'Angelo et al., 2016). En este método, la solución rica en calcio se congela antes de ser sumergida en el baño de alginato. Al congelar la solución, se forma un núcleo sólido que mantiene su forma en el baño de alginato, permitiendo una gelificación más uniforme y controlada. Esta técnica es ideal para crear esferas más grandes o para ingredientes que requieren un manejo más delicado (Low & Pui, 2020).

La esferificación inversa y su variante congelada representan técnicas cruciales en la vanguardia de la gastronomía molecular (Khajehie et al., 2023). Estas metodologías no solo ofrecen soluciones creativas para superar las limitaciones encontradas en la esferificación directa, sino que también brindan a cocineros y científicos la oportunidad de experimentar con una amplia gama de sabores, texturas y formas (Faculty of Hotel & Tourism Management, UiTM Pulau Pinang, 2019). Al expandir el repertorio de técnicas culinarias disponibles, la esferificación inversa enriquece la paleta de herramientas creativas en la cocina contemporánea y contribuye significativamente a la comprensión de las interacciones fisicoquímicas en la preparación de alimentos.

2.3. BASES BIOQUÍMICAS DE LA ESFERIFICACIÓN

2.3.1. ALGINATO

El alginato es un polímero derivado de las algas marinas como los *Kelps* y producidos por ciertas bacterias. El alginato es conocido principalmente por su forma de alginato de sodio, un destacado miembro de los hidrogeles (Hirst et al., 1939). Estos son estructuras poliméricas reticuladas y absorbentes de agua, formadas por la reacción simple de monómeros (uno o más).

Descubierto en el *Kelp* en 1883, el alginato de sodio ha sido objeto de extensas investigaciones, y utilizado en la industria alimentaria y médica como espesantes, emulsionantes y estabilizadores (Hecht & Srebnik, 2016; Hirst et al., 1939). Como heteropolisacáridos aniónicos e hidrofílicos, los alginatos abundan en algas pardas (*Phaeophyceae*) y en cápsulas bacterianas del suelo (Khajouei et al., 2018). Las macroalgas, divididas en marrones, verdes y

rojas por sus pigmentos, tienen polisacáridos matriciales específicos, siendo el alginato el predominante en las marrones. A pesar de la presencia de alginato en varias especies de algas marrones, su producción comercial es limitada por la abundancia y ubicación (Gómez et al., 2009).

El alginato es extraído de algas pardas junto con fucoidanos y laminaranos, utilizados por sus propiedades biológicas (Ponce & Stortz, 2020). Asimismo, la producción bacteriana de alginato fue reportada en *Pseudomonas aeruginosa* y otras especies no patógenas, así como en *Azotobacter vinelandii* (Ale & Meyer, 2013; Dobrinčić et al., 2020). Los alginatos comerciales, no obstante, provienen principalmente de *Laminaria hyperborea*, *Laminaria digitata*, *Macrocystis pyrifera* y otras especies, con una producción anual estimada en 23,000 toneladas de alginato de 85,000 toneladas de algas (Rehm & Valla, 1997). Su composición puede variar hasta el 40% del peso seco de las algas, dependiendo de la fuente (Bertagnolli et al., 2014; Clementi et al., 1995; Fernando et al., 2020).

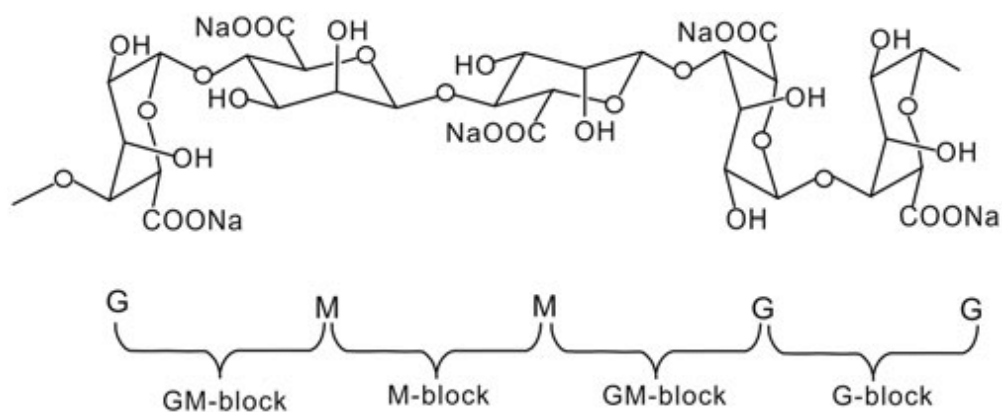
Las propiedades del alginato son influenciadas por la disposición de monómeros, el peso molecular, la longitud de la cadena de ácido urónico y la proporción de monómeros (Mohammed et al., 2020). Estas características varían según la especie de alga, edad, ubicación y estación, afectando su funcionalidad, solubilidad, interacción con iones metálicos, viscosidad y formación de geles (De Silva & Kumar, 1984).

2.3.2. ESTRUCTURA MOLECULAR DEL ALGINATO

El alginato es un polisacárido aniónico conformado por copolímeros lineales encontrados en la matriz de la pared celular de algas pardas (Mohammed et al., 2020). El alginato está compuesto por dos unidades monoméricas: ácido β -D-manurónico (ManAp o M) y ácido α -L-gulurónico (GulAp o G), enlazados respectivamente en conformaciones β -(1,4) y α -(1,4), como se muestra en la Figura 1.

Figura 1.

Características estructurales del alginato. M: residuo de manuronato; G: residuo de guluronato



Nota: Tomado de “Alginate-based composites for environmental applications: A critical review” (p. 2), por Wang et al., 2018, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(4), 318–356.

El alginato muestra una amplia diversidad estructural y propiedades fisicoquímicas (Ching & Bansal, 2015; Hentati et al., 2018; Lársen et al., 2003). Los diferentes tipos de alginatos se distinguen por una serie de características clave, incluyendo su masa molecular (M_w , peso molecular promedio en peso; M_n peso molecular promedio en número), índice de polidispersidad (M_w/M_n), y diversos parámetros macromoleculares como la viscosidad intrínseca ($[\eta]$), concentración crítica (C^*), el giro (R_g) y los radios relacionados con sus propiedades hidrodinámicas (R_h ; Lársen et al., 2003). Además, es importante la proporción M/G (proporción entre dos tipos de ácidos urónicos que componen el alginato: ácido β -D-manurónico (M) y ácido α -L-gulurónico (G)) y las frecuencias de secuencias monoméricas (M y G), dímeros (GG, MM, MG, GM) y trímeros (MMG, GGM, MGM; Hentati et al., 2018). Estas características estructurales están directamente relacionadas con sus propiedades reológicas, como la formación de geles y la capacidad de espesamiento, tanto en soluciones como en presencia de iones monovalentes (K^+ , Na^+) y divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+} ; Fernando et al., 2020). La disposición de los bloques de ácido gulurónico (G) y ácido manurónico (M) en el alginato varía según su origen, pudiendo ser secuencial (secuencias de GGGG o MMMM), alternante (patrones de GMGMGMGM) o aleatoria (Ching & Bansal, 2015). La estructura del alginato es lineal y flexible, formando una barrera estérica alrededor de los grupos carboxilo, con los bloques G creando estructuras más plegadas y rígidas. Los alginatos comerciales se ofrecen en forma de sales de sodio, potasio o amonio, y su peso molecular varía entre 60,000 y 700,000 Daltons, dependiendo de su uso específico (Sellimi et al., 2015).

El alginato posee grupos hidroxilo y carboxilo, facilitando enlaces de hidrógeno intramoleculares. Los oligosacáridos del alginato (AOS), oligómeros con 2-25 monómeros, se

obtienen mediante hidrólisis, síntesis orgánica o biosíntesis (Saraswathi et al., 2003). Estos métodos incluyen despolimerización del alginato con H_2O_2 (Xing et al., 2020), producción de pentámeros de ácido manurónico mediante glicosilación ortogonal y generación de AOS a partir de glucosa por *Pseudomonas mendocina* NK-01 en condiciones de escasez de nitrógeno (Kumar & Sahoo, 2017). Los AOS, con menor peso molecular y mejor solubilidad, son reconocidos por sus propiedades biológicas, incluyendo efectos inmunomoduladores, antimicrobianos, antioxidantes, probióticos, antihipertensivos, antidiabéticos, antitumorales, anticoagulantes, protectores de la luz, antibacterianos, antilipídicos y antihipoglucémicos (Kawada et al., 1999). Además, tienen usos en la regulación del crecimiento de plantas, como prebióticos, suplementos en acuicultura, avicultura, cerdos, estimulantes del crecimiento de plantas y microorganismos, crioprotectores en alimentos congelados y tratamientos postcosecha (Yokose et al., 2009; Y. Zhang et al., 2014).

Algunos alginatos, como los de *Sargassum* y *Turbinaria*, poseen baja relación M/G, útiles para formar geles sólidos (Torres et al., 2007). Estudios han mostrado variaciones en la relación M/G del alginato de sodio entre diferentes especies de algas (Rehm & Valla, 1997). Por ejemplo, el alginato de *Sargassum* varía de 0.8 a 1.5, mientras que *Laminaria* tiene una relación de 2.26. Se descubrió que el alginato de *Sargassum filipendula* varía del 15.1% al 17.2% en peso seco, siendo las algas de primavera la fuente más rica, con una relación M/G menor a 1, ideal para geles en alimentos e industrias (Mohammed et al., 2020). En *Saccharina japonica*, la relación M/G varía en diferentes partes del alga, indicando una transformación de M en G con el envejecimiento (Nai-Yu et al., 1994).

El proceso de extracción del alginato de sodio a partir de las diferentes fuentes involucra cinco pasos: extracción con ácido mineral de algas secas y trituradas, separación de ácidos alginicos insolubles, tratamiento alcalino para convertirlos en alginato de sodio, precipitación y purificación, incluyendo la formación de alginato de calcio o el uso de etanol (Fernando et al., 2020).

2.3.3. PROCESOS FISICOQUÍMICOS INVOLUCRADOS EN LA ESFERIFICACIÓN

Para comprender los procesos fisicoquímicos que tienen lugar durante la esferificación, es fundamental analizar las reacciones y las interacciones de los componentes clave: alginato, iones de calcio y la solución a esferificar.

La reacción de gelificación es un aspecto esencial en la esferificación, esta reacción tiene lugar a medida que los iones de calcio se introducen en la solución de alginato, desencadenando una serie de eventos químicos que culminan la formación de una esfera sólida que encapsula la solución líquida (Bajpai et al., 2016; Rezvanian et al., 2017).

La reacción química fundamental en este paso es la coordinación iónica entre el alginato y los iones de calcio, como se visualiza en la Figura 2. La coordinación iónica se basa en la atracción electrostática de los grupos carboxilo cargados negativamente (-COOH) presentes en las cadenas de alginato y los iones de calcio (Ca^{2+}) cargados positivamente en la solución del baño de inmersión (Arriola et al., 2019; Celep et al., 2022).

La reacción química se representa de la siguiente forma:

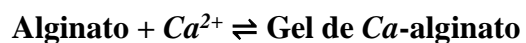
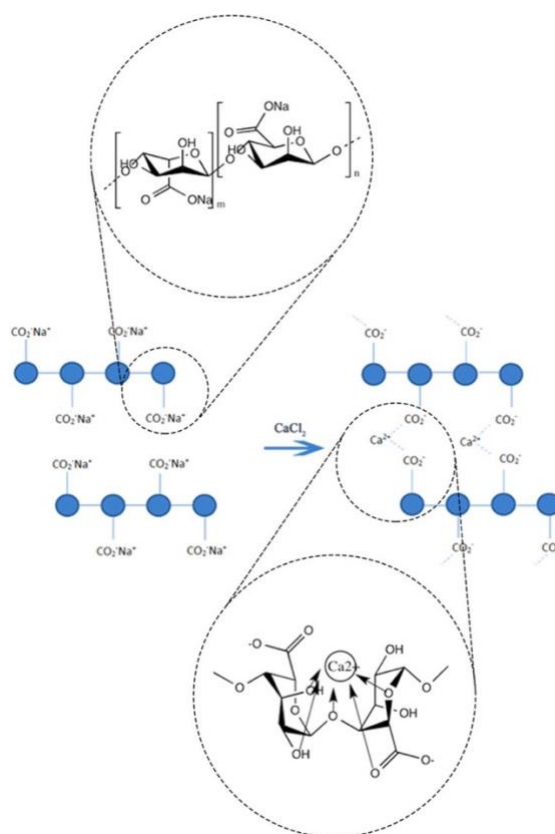


Figura 2.

Formación de enlaces en la reacción del cloruro de calcio con alginato de sodio

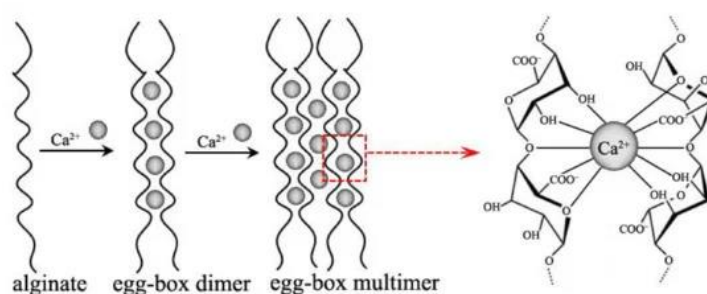


Nota: Tomado de “Investigating the potential use of polymeric materials in the preparation of temporary cosmetic teeth painting veneers.” (p. 3), por Nazha, 2020, *Materials Research Express*, 7(7), 075307.

Durante el proceso de atracción electrostática, los electrones de los grupos carboxilo se redistribuyen, permitiendo la formación de un enlace químico con el ion de calcio. Este enlace químico se conoce como un enlace de coordinación y es esencial para la gelificación. La formación de un enlace de calcio es un proceso dinámico y altamente específico. Cada ion de calcio (Ca^{2+}) puede establecer enlaces de coordinación con varios grupos carboxilo en las cadenas de alginato. Estos enlaces son temporales y pueden romperse y reformarse a medida que los iones de calcio se difunden a través de la solución de alginato (Hernández-González et al., 2020; Mancini & McHugh, 2000). Cuando múltiples enlaces de coordinación se establecen entre un ion de calcio y varios grupos carboxilo en diferentes cadenas de alginato, se forma una estructura de red de puentes de calcio. Esta red tridimensional es la base de la gelificación (Lucía et al., 2017).

Figura 3.

Uniones en egg-box del ion calcio y el bloque G del alginato.



Nota: Tomado de “Fabrication, property and Application of calcium alginate fiber: a review.”

(p. 2), por Zhang et al., 2022, *Polymers*, 14(15), 3227.

La formación de la red de puentes de calcio atrapa la solución líquida en el interior de la estructura tridimensional, como se observa en la Figura 3. A medida que la red se vuelve más densa debido a una mayor concentración de iones de calcio y grupos carboxilo, la gelificación progresa más rápidamente. La uniformidad y la calidad de la gelificación dependen de la densidad y la distribución de estos enlaces de calcio en toda la solución de alginato (Li et al., 2016). Por lo tanto, controlar estos factores es esencial para obtener esferas de alta calidad.

2.3.4. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y SENSORIAL DE ESFERAS DE ALGINATO

El proceso de análisis de las esferas creadas mediante esferificación implica el uso de técnicas para determinar las características físico, químicas y sensoriales (This, 2006). La microscopía electrónica de barrido (SEM) permite obtener imágenes de alta resolución que revelan la morfología y textura de las esferas de esferificación (Jiménez-Regalado et al., 2021). Para una observación efectiva mediante SEM, las muestras requieren una preparación cuidadosa, que incluye, en algunos casos, la aplicación de un recubrimiento conductor para optimizar la calidad de la imagen. Esta técnica descubre aspectos de la integridad y uniformidad de la superficie de las esferas (Chandler & Roberson, 2009).

Las imágenes capturadas por SEM son posteriormente analizadas cuantitativamente utilizando *ImageJ*, un software especializado que facilita la medición precisa de dimensiones críticas como el diámetro y la circunferencia de las esferas, además de identificar y cuantificar

cualquier irregularidad en su forma (Collins, 2007). Este permite comprender cómo las variables del proceso, incluyendo la concentración de alginato y la proporción de iones de calcio, impactan el resultado final de la esferificación. *ImageJ* también posibilita realizar análisis estadísticos de grupos de esferas, proporcionando una evaluación integral de la consistencia del proceso en términos de uniformidad en tamaño y forma (Abramoff, 2004).

En el ámbito químico, la espectroscopía infrarroja (IR) se emplea para analizar los grupos funcionales presentes en el alginato y como estos interactúan con los iones de calcio (Stuart, 2005; Ng & Simmons, 1999). Esta técnica es indispensable para identificar cambios estructurales que ocurren durante la gelificación (O'Brien, 2013). Complementariamente, la resonancia magnética nuclear (RMN) proporciona un análisis más profundo de la estructura molecular del alginato, revelando información detallada sobre la disposición de los átomos y la configuración de las cadenas de alginato (Nott & Hall, 2008; This & Rutledge, 2009).

La estructura molecular del alginato, por otra parte, se caracteriza mediante técnicas la cromatografía de intercambio iónico de alto rendimiento con detección amperométrica pulsada (HPAEC-PAD; Ispiryan et al., 2019) y la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas e ionización electrónica (GC/MS-EI: Hentati et al., 2018). Estas técnicas permiten determinar la relación M/G (Sari-Chmayssem et al., 2015).

La espectroscopía de masa y la cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC) son centrales en la evaluación de la composición y pureza de las soluciones utilizadas (Suo et al.,

2023). La espectroscopía de masa identifica la composición molecular y estructural de las soluciones, mientras que la HPLC es invaluable para determinar la concentración exacta de los componentes. Estas técnicas son esenciales para ajustar formulaciones y optimizar protocolos de esferificación, asegurando así resultados consistentes y de alta calidad (Sacchi et al., 2013).

El análisis sensorial, otra faceta importante del estudio, se lleva a cabo a través de paneles de cata y pruebas sensoriales estructuradas (ŞahiN, 2022). Estas pruebas, realizadas por evaluadores expertos, ofrecen valoraciones objetivas y comparables de las características sensoriales de las esferas de alginato, como la textura, el sabor y la apariencia (Amaral et al., 2019). La metodología empleada en estas pruebas garantiza la recopilación de datos confiables y reproducibles, cuyos resultados se analizan estadísticamente para extraer conclusiones objetivas y fiables.

El análisis integral físico, químico y sensorial permite comprender y perfeccionar la técnica de la esferificación, incluyendo los factores que pueden influir en el proceso de gelificación (This, 2006). Además, permite innovaciones culinarias basadas en un enfoque científico riguroso y garantiza que los resultados sean consistentes, reproducibles y de alta calidad.

2.4. FACTORES CRÍTICOS EN EL PROCESO DE ESFERIFICACIÓN

2.4.1. PESO MOLECULAR DEL ALGINATO

El peso molecular del alginato es un factor crítico en el proceso de esferificación influenciando directamente en las propiedades del gel y la eficacia del proceso. El alginato de alto peso molecular, caracterizado por largas cadenas poliméricas, dispone de un número más elevado de sitios de unión para los iones de calcio, lo que resulta en una red de gel más densa y un entrecruzamiento más robusto (Harte & Venegas, 2010). Estas características afectan significativamente la viscosidad y la cinética de gelificación.

La relación entre el peso molecular del alginato y la viscosidad del gel es directamente proporcional. Por ejemplo, estudios han demostrado que la viscosidad del alginato de bajo peso molecular (aproximadamente $1,43 \times 10^5 \text{ g mol}^{-1}$) es considerablemente menor, específicamente 2.4 veces, que la del alginato de mayor peso molecular (alrededor de $3,5 \times 10^5 \text{ g mol}^{-1}$) (Haug et al., 1963). En condiciones experimentales comparables, se observaron diferencias notables en la viscosidad, con 0.05 Pa s para el alginato de menor peso y 0.12 Pa s para el de mayor peso.

Estos datos indican que la densidad de entrecruzamiento en el gel y por consiguiente su viscosidad aumenta con el peso molecular del alginato. La cinética de gelificación también se ve acelerada con el incremento del peso molecular. Alginatos de mayor peso molecular facilitan una gelificación más rápida y eficiente, lo que es vital en aplicaciones donde el tiempo de respuesta y la estabilidad del gel son factores clave (Hu et al., 2020).

El tratamiento ácido, así como la homogeneización a alta presión del alginato de alto peso molecular altera la estructura del alginato, disminuyendo el peso molecular y consecuentemente reduciendo la viscosidad del gel. Esta reducción en la viscosidad facilita ciertas aplicaciones donde se requiere una menor densidad de gel (Y. Li et al., 2019).

En la práctica culinaria, la elección del peso molecular del alginato debe alinearse con las propiedades deseadas del producto final. Por ejemplo, para esferas con una textura más firme y estable se preferiría un alginato de mayor peso molecular. En contraste, para preparaciones que requieren una textura más suave y menos rígida, sería más adecuado un alginato de menor peso molecular (Farrés & Norton, 2014).

La manipulación del peso molecular del alginato ya sea a través del tratamiento ácido o la homogeneización a alta presión, ofrece a los cocineros y científicos de alimentos una herramienta versátil para controlar la textura y la estabilidad de los geles de alginato en una variedad de aplicaciones culinarias (Harte & Venegas, 2010). La comprensión de estas relaciones entre el peso molecular y las propiedades del gel es fundamental para optimizar las técnicas de esferificación y lograr resultados consistentes y de alta calidad.

2.4.2. CONCENTRACIÓN DE ALGINATO

La concentración de alginato en una solución de esferificación es un factor determinante en las características finales del gel, impactando directamente en la viscosidad, la resistencia y la textura de las esferas gelatinosas.

La concentración de alginato influye significativamente en las propiedades reológicas y estructurales del gel. Investigaciones han demostrado que el aumento de la concentración de alginato en un rango de 1% a 4% en peso incrementa la viscosidad, la resistencia a la ruptura y la dureza del gel. Estos cambios se deben al aumento en el número de interacciones de entrecruzamiento entre las moléculas de alginato y los iones de calcio, lo que fortalece la estructura del gel (Farrés et al., 2013). Sin embargo, un exceso en la concentración de alginato puede tener un efecto adverso, limitando la difusión de los iones de calcio a través de la matriz y, por tanto, reduciendo la eficacia de la gelificación.

En estudios donde se varió moderadamente la concentración de alginato, entre 1.3% y 1.7% en peso, no se observaron diferencias significativas en la estructura de las esferas de alginato. Estos resultados sugieren que hay un umbral de concentración óptimo para la formación de esferas de alginato con características deseables (Harte & Venegas, 2010).

La concentración de alginato también influye en la morfología de las esferas producidas durante el proceso de esferificación. A medida que aumenta la viscosidad de la solución de alginato, las esferas tienden a adquirir una forma más esférica. Esto se debe a la mayor resistencia del fluido a deformarse bajo la tensión superficial durante la formación de la gota. Por otro lado, una viscosidad excesivamente alta puede resultar en esferas con formas irregulares, como gotas alargadas, lo que puede ser indeseable para ciertas aplicaciones culinarias (Yang et al., 2020).

En la práctica culinaria y en la formulación de productos alimentarios, la elección de la concentración de alginato es relevante. Para aplicaciones donde se requiere una textura más

firme y una mayor resistencia del gel, como en la creación de esferas que deben mantener su forma e integridad bajo ciertas condiciones, se preferiría una concentración más alta de alginato (Jiao et al., 2019). En cambio, para aplicaciones que requieren una textura más suave o una liberación más rápida del contenido encapsulado es adecuado una concentración menor de alginato.

En el contexto de la innovación gastronómica, la manipulación de la concentración de alginato ofrece a los cocineros una herramienta para explorar nuevas texturas y formas en los platos. Por ejemplo, una concentración adecuada de alginato puede permitir la creación de esferas que explotan en la boca, liberando sabores intensos, mientras que una concentración diferente podría ser utilizada para crear texturas más suaves y delicadas (Hu et al., 2020).

2.4.3. CONCENTRACIÓN DE IONES DE CALCIO

La concentración de iones de calcio (Ca^{2+}) juega un rol esencial en la esferificación, determinando no solo la rapidez de la gelificación sino también las características finales del gel de alginato.

El incremento de la concentración de Ca^{2+} en la solución acelera notablemente el proceso de gelificación por entrecruzamiento. Esta aceleración se debe a la difusión más rápida de los iones de calcio en el alginato, lo que resulta en un aumento de las propiedades como la viscosidad, la elasticidad y, en última instancia, la estabilidad del gel. La relación crítica entre la concentración de Ca^{2+} y los grupos carboxilo en el alginato se expresa como el valor R,

calculado como $R = [Ca^{2+}]/[COO^-]$ (J. Li et al., 2016). Este valor R es fundamental para comprender cómo los iones de calcio afectan la estructura y las propiedades del gel de alginato.

El entrecruzamiento de las cadenas de alginato con iones de calcio se realiza en tres etapas distintas:

1. **Monocomplejación ($R < 0.25$)**, donde se forman uniones individuales entre iones de calcio y grupos carboxilo.
2. **Dimerización ($0.25 < R < 0.55$)**, que conduce a la formación de una estructura de tipo "caja de huevos", una red entrecruzada de cadenas de alginato.
3. **Asociación lateral ($R > 0.55$)**, donde se forman enlaces entre múltiples cadenas de alginato, dando lugar a una red polimérica más compleja y robusta.

La máxima viscosidad y tensión de tracción del gel de alginato se alcanza alrededor del 1.4% (p/p) de $[CaCl_2]$ para una concentración de alginato de aproximadamente 127 mM. Esto se debe a la saturación óptima de Ca^{2+} en las cadenas de alginato. Sin embargo, una concentración excesiva de calcio puede ser contraproducente, ya que los iones de calcio en exceso pueden generar cargas positivas que segregan las cadenas de alginato, llevando a la desintegración del gel. Este fenómeno destaca la importancia de un equilibrio preciso en la concentración de iones de calcio durante la esferificación (Fang et al., 2007).

En la producción de esferas de alginato, la concentración de Ca^{2+} también influye en su morfología. A concentraciones más altas de Ca^{2+} , las perlas tienden a ser menos esféricas (Chuang et al., 2017). Esto se debe a la rapidez con la que ocurre la gelificación, que puede

afectar la forma en que las gotas de alginato mantienen su forma durante la inmersión en la solución de calcio.

En la práctica, elegir la concentración correcta de iones de calcio es esencial para lograr la textura, la firmeza y la estabilidad deseada del gel de alginato. Para aplicaciones culinarias donde se busca una textura específica o una liberación controlada de sabores, ajustar la concentración de Ca^{2+} puede ser una herramienta valiosa (Cuadros et al., 2012). Por ejemplo, una concentración más baja podría usarse para crear esferas con un núcleo más líquido, mientras que una concentración más alta podría ser adecuada para esferas que requieren mayor firmeza y estabilidad.

2.4.4. DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE RESIDENCIA

El tiempo de residencia, definido como la duración durante el cual el alginato se mantiene en contacto con los iones de calcio en el baño de gelificación, es un factor decisivo que influye en el proceso de esferificación. Este periodo determina la eficacia de la reticulación del alginato y, por tanto, las propiedades finales del gel (Evageliou, 2000).

Durante el tiempo de residencia, los iones de calcio migran desde la superficie de la gota de alginato hacia el interior, un proceso que es crucial para la formación efectiva de las esferas de gel. La duración óptima para este proceso, conocida como tiempo de gelificación (t_{gel}), se calcula utilizando la segunda ley de Fick. Esta ley se expresa con la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Donde C representa la concentración de alginato (mol m^{-3}), t es el tiempo (s), D el coeficiente de difusión de la sustancia ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), y x la posición (m).

Esta ley se puede aproximar como:

$$t_{gel} \approx \frac{D}{CL^2}$$

Aquí, t_{gel} es el tiempo de residencia, C denota la concentración de alginato, L es una longitud característica (como el radio de la perla), y D es el coeficiente de difusión del cloruro de calcio en agua, típicamente alrededor de $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Investigaciones han mostrado que, tras un tiempo de residencia de 30 minutos, las muestras expuestas a distintas concentraciones de calcio exhiben comportamientos similares en términos de gelificación (Hartmann et al., 2006).

El tiempo de residencia es estratégico para la formación adecuada de esferas de alginato. Un periodo de exposición insuficiente podría resultar en una reticulación incompleta, mientras que un tiempo excesivo podría llevar a una gelificación excesiva, alterando la textura deseada de las esferas. Interesantemente, estudios han demostrado que el tiempo de residencia no tiene un impacto significativo en la esfericidad de las perlas, lo que sugiere que otros factores como la viscosidad del alginato y la concentración de calcio son más críticos en este aspecto (Cuadros et al., 2012).

En el contexto culinario y científico, comprender y controlar el tiempo de residencia es esencial para la producción consistente de esferas de alginato con las características deseadas. Para aplicaciones que requieren un núcleo líquido, como en la creación de caviar artificial o esferas de sabor, un tiempo de residencia optimizado asegura que la reticulación del alginato sea suficiente para formar una membrana estable sin comprometer la liquidez interior (Evageliou, 2000; Cuadros et al., 2012). Por otro lado, en aplicaciones donde se necesita mayor firmeza o estabilidad estructural, como en la encapsulación de probióticos o en la creación de esferas más grandes, ajustar el tiempo de residencia permite alcanzar la textura y consistencia adecuadas.

2.4.5. VELOCIDAD DE CIZALLAMIENTO

La tasa de cizallamiento durante el proceso de gelificación del alginato es un factor decisivo que influye significativamente en las dinámicas de la gelificación y las propiedades finales del gel. Jiao et al. (2019) destacaron la importancia de la tasa de cizallamiento en la técnica de "adición in situ de calcio", la cual se utiliza para lograr una gelificación más homogénea y evitar las limitaciones asociadas con métodos de gelificación externa.

La aplicación de cizalla al inicio del proceso de gelificación tiene un impacto notable en el tiempo de inicio y la rapidez con que se forman las partículas de gel. Según Jiao y colaboradores, al aplicar cizallamiento en las etapas iniciales, se observó un retraso en el inicio de la gelificación (Jiao et al., 2019). Sin embargo, una vez que el proceso comenzaba, la

formación de partículas de gel era más rápida en comparación con métodos sin aplicación de cizallamiento.

Una observación clave reportada por Mancini and McHugh (2000) es la disminución en la viscosidad del gel con el aumento de la tasa de cizallamiento. Este fenómeno indica una relación directa entre la tasa de cizallamiento y las propiedades reológicas del gel de alginato. A medida que se incrementa el cizallamiento se modifica la estructura interna del gel afectando su viscosidad y elasticidad.

Desde un punto de vista práctico, el control de la tasa de cizallamiento es esencial para optimizar la textura y las propiedades del gel de alginato. En la gastronomía molecular, donde la precisión en la textura y la consistencia de los productos es fundamental, ajustar la tasa de cizallamiento permite a los cocineros y científicos de alimentos modificar y refinar las propiedades de los geles de alginato (Puguan et al., 2014). Por ejemplo, en la creación de esferas de alginato o en la encapsulación de sabores y aromas, una tasa de cizallamiento adecuada puede garantizar la formación rápida y uniforme de las esferas, con la viscosidad y textura deseadas.

2.4.6. TEMPERATURA

La temperatura durante el proceso de gelificación del alginato desempeña un papel central en la formación y las características del gel resultante. Esta variable afecta significativamente tanto la microestructura como las propiedades físicas del gel de alginato.

Jeong et al. (2020) y otros estudios han demostrado que una temperatura superior a 45°C durante la gelificación mejora la penetración de los iones de calcio a través de la red de alginato, facilitando así el proceso de gelificación. Estos resultados evidencian el incremento en la movilidad molecular, lo que resulta en una mayor tasa de difusión de los iones de calcio y consecuentemente conduce a la formación de un gel más denso. Sin embargo, el módulo de Young (relación entre la tensión y la deformación en el rango elástico de un material) disminuye, indicando una menor rigidez en las esferas generadas (Cerciello et al., 2017).

Por otro lado, temperaturas que oscilan entre 36-40°C generan una red de gel más ordenada y regular. Esta estructura organizada es producto de una difusión más lenta de los iones de calcio, lo que resulta en una gelificación más controlada y uniforme (Leo et al., 1990). De esta forma, el gel de alginato presenta un módulo de Young elevado, lo que indica una mayor rigidez y resistencia (Vu et al., 2017).

La temperatura también influye en la viscosidad del alginato y el tamaño de las esferas de gel. Con un aumento en la temperatura de gelificación ($\geq 45^\circ\text{C}$), la viscosidad del alginato disminuye, lo que puede resultar en una reducción en el tamaño de las esferas de alginato. La temperatura no solo afecta la formación de las perlas, sino también su esfericidad (Oates & Ledward, 1990). A temperaturas más altas, se ha observado un incremento en la esfericidad de las perlas de alginato.

Las esferas de alginato presentan una mayor resistencia a la ruptura a temperaturas de gelificación más bajas (5°C). Esta temperatura facilita la formación de la red de gel más controlada y uniforme (Gu et al., 2018). En cuanto a la estabilidad térmica, los geles de alginato

con un mayor contenido de unidades G muestran una mayor estabilidad en un rango de temperatura de 0 a 100 °C (Sanchez-Ballester et al., 2019). Por encima de esta temperatura, se inicia la despolimerización del gel y a 180 °C la estructura del gel se descompone por completo.

2.4.7. FUERZA IÓNICA

La gelificación del alginato se ve considerablemente influenciada por la fuerza iónica de la solución, un factor que afecta la estabilidad y la estructura del gel. Este fenómeno se debe a la interacción entre los iones de calcio y las sales monovalentes presentes en la solución.

En soluciones de baja fuerza iónica, la formación del gel de alginato se facilita debido a la menor competencia entre los iones monovalentes y los iones de calcio. Los iones de calcio pueden unirse efectivamente a los grupos carboxilo del alginato sin mucha interferencia, lo que permite la formación de un gel estable y coherente (Van Leusden et al., 2017).

Por el contrario, en soluciones con alta fuerza iónica, especialmente aquellas ricas en sales monovalentes como el cloruro de sodio (NaCl), se observa una competencia intensa por los sitios de unión en las moléculas de alginato. van Leusden et al. (2017) y Jiao et al. (2019) reportan que esta competencia puede llevar a una alteración estructural significativa de los geles y esferas de alginato. Los iones de sal pueden desplazar algunos iones de calcio de sus sitios de unión en el alginato, lo que resulta en la desestabilización y eventual desintegración del gel.

El aumento en la concentración de sales monovalentes puede reducir las interacciones electrostáticas atractivas en el sistema de gelificación, lo que podría traducirse en el aumento

del tamaño de los poros de las esferas de alginato (Jiao et al., 2019). Este cambio de la microestructura del gel facilita la liberación de los compuestos encapsulados, lo cual es una consideración cardinal en aplicaciones donde el alginato se utiliza para la encapsulación controlada y la liberación de ingredientes activos.

2.4.8. pH

El pH de una solución tiene influencia significativa en la solubilidad del alginato y la capacidad para unir iones. Esta relación es atribuible a las variaciones en las cargas electrostáticas de las unidades M y G del alginato, que se alteran con los cambios en el pH (Park et al., 2019).

Las unidades M y G del alginato tienen puntos isoeléctricos (pKa) de 3.38 y 3.65 respectivamente. Generalmente, se estima que el pKa de los residuos del polímero de alginato es de 3.4 (Haug et al., 1963). Estos valores de pKa implican que el alginato que tiene unidades principalmente MG es más soluble en ambientes de pH bajo y tiende a precipitar a un pH aproximado de 2.6 a 2.7. Por otro lado, el alginato rico en unidades G precipita en un rango de pH cercano a 3.25 (Zazzali et al., 2019).

A medida que el pH aumenta, superando el umbral de 10.5, los enlaces glucosídicos en la red del gel de alginato comienzan a debilitarse y eventualmente se rompen, conduciendo a la degradación estructural del gel. Esta despolimerización es una consideración vital en aplicaciones donde se requiere la estabilidad del gel a un rango de pH más amplio (Sonego et al., 2016).

Investigaciones han demostrado que los geles de alginato formados a un pH de 3.8 poseen una microestructura más densa y mejor interconectada, lo que se traduce en interacciones más robustas entre las cadenas. Este tipo de red de gel reduce la sinéresis (la expulsión de líquido) y la contracción del gel, resultando en una estructura más estable y consistente (Zazzali et al., 2019). Por el contrario, los geles formados a un pH igual o superior a 5 tienden a tener una menor interconectividad y densidad en su microestructura, lo que facilita la sinéresis y la contracción del gel (Jeong et al., 2020).

Durante la producción de esferas de alginato, el pH contribuye en la determinación de su forma y estabilidad. Las esferas creadas en un baño de gelificación de pH bajo suelen ser oblatas, especialmente a concentraciones más bajas de alginato y iones (Augst et al., 2006). En cambio, las esferas formadas a un pH superior a 4 generalmente adquieren una forma más globoide. Este efecto es notablemente evidente en la tensión interfacial entre el alginato y la solución de gelificación, siendo más baja a valores de pH reducidos (Topuz et al., 2012).

La tabla 1 muestra las condiciones óptimas en el proceso de esferificación en las cuales se incluye características del alginato e iones de calcio, tiempo de residencia, velocidad de cizallamiento, temperatura y pH.

Tabla 1.*Condiciones óptimas en el proceso de esferificación*

Factor	Unidad de Medida	Rangos Óptimos	Características y propiedades de las esferas
Peso Molecular del Alginato	g mol ⁻¹	$\sim 1.43 \times 10^5$ - $\sim 3.5 \times 10^5$	<p>Viscosidad y la cinética de gelificación.</p> <p>Mayor peso molecular conduce a mayor viscosidad y una gelificación más rápida y eficiente (Hu et al., 2020).</p>
Concentración de Alginato	% p/p	1% - 4%	<p>Viscosidad, la resistencia y la textura del gel.</p> <p>Concentraciones más altas generan geles más densos y firmes (Farrés et al., 2013).</p>
Concentración de Iones de Calcio	mM	Valor R óptimo: 1.4% (p/p) para alginato ~ 127 mM.	<p>Velocidad de gelificación y la estructura del gel.</p> <p>Concentraciones adecuadas aseguran una gelificación eficiente y una estructura de gel</p>

			<p>óptima (Cuadros et al., 2012).</p>
Tiempo de Residencia	Minutos	~30 minutos para gelificación homogénea.	<p>Reticulación adecuada del alginato y la formación de un gel uniforme.</p> <p>Tiempos más largos pueden resultar en una gelificación excesiva (Cuadros et al., 2012; Hartmann et al., 2006).</p>
Velocidad de Cizallamiento	s^{-1}	10 - 1,000 s^{-1}	<p>Distribución y tamaño de las partículas de gel.</p> <p>Tasas más altas pueden disminuir la viscosidad y cambiar la morfología del gel (Jiao et al., 2019).</p>
Temperatura	$^{\circ}C$	0 - 100 $^{\circ}C$.	<p>Microestructura y propiedades físicas del gel.</p> <p>Temperaturas más altas facilitan la penetración de iones de calcio y pueden alterar la rigidez del gel (Hartmann et al., 2006).</p>

Fuerza Iónica	mM	0 - 150 mM	<p>Estabilidad del gel y la interacción del alginato con los iones de calcio.</p> <p>Fuerzas iónicas bajas favorecen una gelificación estable; fuerzas iónicas altas pueden desestabilizar el gel (Van Leusden et al., 2017).</p>
pH	Unidad de pH	pH 3.8 para una microestructura densa y estable.	<p>El pH óptimo depende del tipo de alginato utilizado. Influencia la solubilidad del alginato y la estabilidad del gel.</p> <p>Un pH bajo mejora la solubilidad y la capacidad de unión de iones (Augst et al., 2006).</p>

2.5. POTENCIAL INDUSTRIAL DE LA ESFERIFICACIÓN EN GASTRONOMÍA MOLECULAR

2.5.1. VIABILIDAD DEL PROCESO DE ESFERIFICACIÓN A ESCALA INDUSTRIAL

La implementación de técnicas de esferificación a escala industrial plantea desafíos significativos, particularmente en lo que respecta a la adquisición y manejo de ingredientes en grandes volúmenes. La transición de un entorno de cocina experimental a una producción industrial requiere un enfoque meticuloso para garantizar la calidad y consistencia del producto final (This, 2006).

2.5.1.1. MATERIA PRIMA

La selección de proveedores de la materia prima a utilizar en procesos de esferificación a gran escala es un paso imperativo. Es necesario identificar y elegir proveedores que suministren alginato y agentes de calcificación en las cantidades y calidad que se requieran en el proceso (Singh & Bagade, 2022). La consistencia en la calidad del alginato es vital ya que cualquier variabilidad puede afectar significativamente las características de las esferas producidas. Por lo tanto, es importante realizar pruebas de calidad exhaustivas y asegurarse de que los proveedores cumplan con las regulaciones y normativas pertinentes, especialmente las relacionadas con la seguridad alimentaria (Aguilea & Lillford, 2008).

Establecer contratos a largo plazo con proveedores seleccionados puede garantizar un suministro continuo y también podría abrir la posibilidad de negociar precios más favorables, beneficiando la economía del proceso de producción. Además, la implementación de un riguroso control de calidad para los ingredientes es esencial (De Farias & Noreña, 2019). Esto incluiría pruebas de laboratorio para verificar la pureza, la concentración y otras propiedades químicas y físicas de los ingredientes. Estas prácticas aseguran que los ingredientes cumplan con las especificaciones técnicas detalladas y mantengan la consistencia en la calidad del producto final (Riddick et al., 2016).

Implementar sistemas avanzados de gestión de inventarios es fundamental para mantener un seguimiento preciso del stock de ingredientes. Esto ayuda a evitar la escasez o el exceso de inventario, lo cual es importante para ingredientes con una vida útil limitada. Además, la utilización de herramientas de planificación de la demanda permite anticipar las necesidades de producción y ajustar los niveles de inventario en consecuencia, asegurando que la producción esté alineada con la demanda del mercado (Tsai, Chiang, et al., 2017).

2.5.1.2. PRODUCCIÓN

Asimismo, para lograr una implementación efectiva de la esferificación a gran escala, la elección de equipos y maquinarias un factor determinante. La maquinaria utilizada en este proceso debe ser capaz de manejar grandes volúmenes de producción, garantizando al mismo tiempo la precisión y uniformidad necesarias para la formación de esferas de alta calidad (罗司丹, 陈慧凌, 王兆梅, 2020).

El equipo para mantener las condiciones óptimas de gelificación que incluye sistemas de control de temperatura y agitación que aseguran una gelificación uniforme en todas las esferas garantizan la producción. Los tanques de gelificación deben diseñarse para mantener la temperatura y la concentración de los baños de calcio constantes, evitando variaciones que podrían afectar la calidad del producto final (Vollath et al., 1989).

Además, se requiere equipo especializado para la dosificación precisa de las soluciones de alginato y del baño de calcio. Este equipo debe tener la capacidad de dispensar cantidades exactas y consistentes para asegurar la uniformidad en el tamaño y la forma de las esferas. Los dosificadores automatizados que pueden controlarse con precisión para ajustar el tamaño de las gotas, son esenciales en este aspecto (Sen, 2017). Estos dispositivos deben ser capaces de operar a altas velocidades sin sacrificar la precisión, lo cual es fundamental para mantener la eficiencia de la producción en grandes volúmenes (Adrià et al., 2010).

Equipos o sistemas de filtrado y limpieza de las esferas de alginato son pasos vitales en el proceso de producción. Se necesitan equipos que puedan realizar eficientemente estos procesos, eliminando el exceso de solución de calcio y cualquier otro residuo. Esto no solo es importante para la calidad del producto, sino también para cumplir con los estándares de seguridad alimentaria. La maquinaria utilizada en este paso debe ser fácil de limpiar y desinfectar para evitar la contaminación cruzada (Vainiotalo & Matveinen, 1993).

Además, los equipos seleccionados deben cumplir con los estándares de higiene y seguridad alimentaria. Esto significa que deben estar fabricados con materiales que sean seguros para el contacto con alimentos y fáciles de limpiar para evitar la acumulación de bacterias o residuos (Talaver, 2014). La eficiencia energética y la facilidad de mantenimiento también son consideraciones esenciales, ya que afectan tanto a los costos operativos como a la sostenibilidad general del proceso de producción.

En el contexto de la producción industrial de alimentos esferificados, el cumplimiento riguroso de las normativas de seguridad alimentaria es fundamental. Cada etapa del proceso, desde la preparación de ingredientes hasta el empaquetado del producto final, debe estar diseñada para maximizar la higiene y minimizar los riesgos para la salud.

La higiene en la producción de alimentos esferificados implica no solo la limpieza y desinfección regulares de los equipos y las instalaciones, sino también la implementación de procedimientos estandarizados para manejar los ingredientes y los productos (Silva, 2023). Esto incluye el uso de equipos de protección personal (EPP), como guantes y mascarillas, por parte de los operarios, y la adopción de prácticas de manipulación de alimentos que eviten la contaminación cruzada.

El control de la temperatura es otra consideración imperativa para evitar la proliferación de microorganismos. Durante el proceso de esferificación, tanto las soluciones de alginato como los baños de calcio deben mantenerse a temperaturas que inhiban el crecimiento bacteriano.

Además, el almacenamiento de ingredientes y productos terminados debe realizarse en condiciones óptimas de temperatura y humedad para preservar su calidad y seguridad (Bubin et al., 2019).

La trazabilidad de los ingredientes es igualmente importante en la gestión de la seguridad alimentaria. Los sistemas de trazabilidad permiten rastrear la procedencia de cada ingrediente utilizado en la producción, lo cual es esencial para responder eficazmente en caso de un problema de seguridad alimentaria (C. Vega et al., 2012). Estos sistemas ayudan a identificar rápidamente el origen de cualquier contaminante y facilitan la toma de medidas correctivas, minimizando así el impacto en la salud pública y manteniendo la confianza del consumidor (Vollath et al., 1989).

Del mismo modo, es vital asegurar que todos los ingredientes y aditivos utilizados en la producción de alimentos esferificados cumplan con las regulaciones alimentarias pertinentes. Esto implica verificar que los alginatos, agentes de calcificación y otros componentes estén aprobados para su uso en alimentos y no representen riesgos para la salud (Da Cruz et al., 2023).

2.5.1.3. ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

Por otro lado, la viabilidad económica de la esferificación a gran escala es un aspecto esencial a considerar en la producción industrial de alimentos. Esta evaluación se basa en un análisis detallado de varios factores de costos, tanto iniciales como operativos, y requiere una cuidadosa planificación y gestión (Ivanovic, 2011). El costo de los ingredientes, incluyendo

alginateos y agentes de calcificación, es un componente significativo del gasto total. Adquirir estos ingredientes en grandes cantidades puede proporcionar ahorro, pero también representa una considerable inversión inicial. La calidad de estos ingredientes es fundamental para asegurar la consistencia del producto final, influyendo así en el costo (Bubin et al., 2019).

La inversión en equipos y maquinaria especializados es otro factor importante. La producción a gran escala de alimentos esferificados necesita equipos que puedan manejar altos volúmenes de producción manteniendo la precisión y uniformidad en la formación de esferas. Esta inversión inicial en maquinaria puede ser alta, pero es esencial para garantizar la calidad y eficiencia del proceso de producción (Paulo et al., 2022). Los gastos operativos continuos, como la mano de obra, el mantenimiento de los equipos, los costos de energía y los gastos generales, deben ser evaluados cuidadosamente. La eficiencia operativa y la reducción de desperdicios son decisivos para minimizar estos costos a largo plazo (C. Vega & Ubbink, 2008).

Es importante comparar los costos de la producción de alimentos esferificados con los métodos de producción tradicionales para evaluar su rentabilidad. Aunque la inversión inicial en la esferificación puede ser mayor, la diferenciación del producto y el valor añadido pueden justificar estos costos. Los alimentos esferificados ofrecen una experiencia única, lo que puede permitir un precio de venta más alto y atraer a un mercado dispuesto a pagar por innovaciones culinarias (Precup et al., 2018, 2021).

Finalmente, el retorno de la inversión es un factor determinante. La capacidad de producir alimentos innovadores y diferenciados puede abrir nuevos mercados y oportunidades de ingresos. Además, una producción eficiente y de alta calidad puede resultar en una mayor rentabilidad a largo plazo (This, 2006, 2008). Aunque la inversión inicial y los gastos operativos pueden ser considerables, el potencial de mercado de los productos esferificados puede ofrecer un retorno de la inversión significativo y sostenible (Aguilera, 2018).

3. CONCLUSIONES

La presente investigación ha profundizado en la esferificación dentro de la gastronomía molecular, un campo que combina arte culinario y ciencia. Este estudio se ha centrado en entender detalladamente los procesos fisicoquímicos implicados en la esferificación, evaluar sus variantes en términos de practicidad y aplicabilidad en la cocina, analizar los factores que inciden en sus resultados y explorar su potencial en la producción alimentaria a gran escala.

En primer lugar, el análisis de los procesos fisicoquímicos involucrados en la esferificación ha revelado detalles cruciales sobre la formación de esferas de gel. La interacción entre el alginato y los iones de calcio es esencial en este proceso. El estudio ha mostrado que la composición molecular del alginato, especialmente la proporción de sus componentes manurónico y glucurónico, y la concentración de iones de calcio influyen en la formación y calidad del gel. Se ha observado que variaciones en la temperatura y el pH durante el proceso de esferificación pueden alterar significativamente la solubilidad del alginato y la estructura del gel resultante, afectando así la textura y la integridad de las esferas.

Al evaluar las variantes de esferificación, como las técnicas directa e inversa, se ha identificado su aplicabilidad en diferentes contextos culinarios. La esferificación directa, adecuada para soluciones sin calcio, y la inversa, preferida para soluciones con alto contenido de calcio o acidez, han mostrado ser versátiles en la cocina molecular. De esta forma se puede comprender la elección de una técnica sobre otra dependiendo de factores como los ingredientes utilizados, el tiempo de preparación requerido y la complejidad del plato a elaborar.

Además, se han examinado los factores que influyen en los procesos de esferificación y sus resultados culinarios. Se ha constatado que variables como la temperatura, el pH y la concentración de reactivos son determinantes en la eficacia de la esferificación. Por ejemplo, temperaturas más elevadas pueden acelerar la gelificación, mientras que variaciones en el pH pueden afectar la solubilidad y el comportamiento del alginato. Estos descubrimientos son fundamentales para controlar y manipular los resultados culinarios de la esferificación, permitiendo así la creación de texturas y sabores novedosos en la gastronomía molecular.

Adicionalmente, se ha explorado el potencial de la esferificación para su uso en la producción alimentaria a gran escala. Este estudio ha considerado aspectos importantes como la selección de materias primas, la estandarización de procesos y la sostenibilidad. A pesar de los desafíos identificados, como la inversión inicial y el cumplimiento normativo, se ha reconocido un potencial significativo en la industria alimentaria para la innovación y diferenciación de productos. La esferificación, al permitir la encapsulación de sabores y la creación de texturas únicas, ofrece oportunidades para revolucionar la producción alimentaria, desde productos de alta cocina hasta aplicaciones más amplias en el mercado de alimentos.

Finalmente, se ha destacado la importancia de comprender a fondo los procesos fisicoquímicos de la esferificación, la evaluación práctica de sus variantes, el reconocimiento de los factores que influyen en la técnica y la exploración de su aplicabilidad en la producción a gran escala. Estos aspectos resaltan el potencial de la esferificación para innovar y diversificar en la industria alimentaria, abriendo nuevas posibilidades para experiencias culinarias enriquecedoras y sostenibles.

REFERENCIAS

- Abramoff, M. (2004). *Image processing with ImageJ*.
<https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/204900>
- Adrià, F., Adrià, A., & Soler, J. (2010). *A day at ElBulli*. Phaidon Press.
- Adrià, F., & elBullifoundation. (2021). *The origins of cooking: Palaeolithic and Neolithic Cooking*. Phaidon Press.
- Aguilea, J. M., & Lillford, P. J. (2008). Food Materials Science. In *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-71947-4>
- Aguilera, J. M. (2018). Relating food engineering to cooking and gastronomy. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(4), 1021–1039. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12361>
- Ale, M. T., & Meyer, A. S. (2013). Fucoidans from brown seaweeds: an update on structures, extraction techniques and use of enzymes as tools for structural elucidation. *RSC Advances*, 3(22), 8131–8141. <https://doi.org/10.1039/c3ra23373a>
- Amaral, F. M., Southgate, A. N. N., Komatsu, R. A., Scheuer, P. M., Maresch, G. A., & Da Silva, J. C. (2019). *Acca sellowiana*: Physical-chemical-sensorial characterization and gastronomic potentialities. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 17, 100159. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2019.100159>
- Arriola, N. D. A., Chater, P. I., Wilcox, M., Lucini, L., Barba, F. J., Dalmina, M., Pearson, J. P., & De Mello Castanho Amboni, R. D. (2019). Encapsulation of stevia rebaudiana Bertoni aqueous crude extracts by ionic gelation – Effects of alginate blends and gelling solutions on the polyphenolic profile. *Food Chemistry*, 275, 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.086>
- Augst, A., Kong, H. J., & Mooney, D. J. (2006). Alginate hydrogels as biomaterials. *Macromolecular Bioscience*, 6(8), 623–633. <https://doi.org/10.1002/mabi.200600069>

- Bajpai, M., Shukla, P., & Bajpai, S. (2016). Ca(II)+Ba(II) ions crosslinked alginate gels prepared by a novel diffusion through dialysis tube (DTDT) approach and preliminary BSA release study. *Polymer Degradation and Stability*, *134*, 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.09.027>
- Barham, P. (2003). *Die letzten Geheimnisse der Kochkunst: Hintergründe - Rezepte - Experimente*. Springer Verlag.
- Barham, P., Skibsted, L. H., Bredie, W. L., Frøst, M., Møller, P., Risbo, J., Snitkjær, P., & Mortensen, L. M. (2010). Molecular Gastronomy: a new emerging scientific discipline. *Chemical Reviews*, *110*(4), 2313–2365. <https://doi.org/10.1021/cr900105w>
- Berkowitz, S. A., Delahanty, L. M., Terranova, J., Steiner, B., Ruazol, M., Singh, R., Shahid, N. N., & Wexler, D. J. (2018). Medically Tailored Meal Delivery for Diabetes Patients with Food Insecurity: a Randomized Cross-over Trial. *Journal of General Internal Medicine*, *34*(3), 396–404. <https://doi.org/10.1007/s11606-018-4716-z>
- Berkowitz, S. A., Terranova, J., Hill, C., Ajayi, T., Linsky, T., Tishler, L. W., & DeWalt, D. A. (2018). Meal Delivery Programs Reduce The Use Of Costly Health Care In Dually Eligible Medicare And Medicaid Beneficiaries. *Health Affairs*, *37*(4), 535–542. <https://doi.org/10.1377/hlthaff.2017.0999>
- Berkowitz, S. A., Terranova, J., Randall, L., Cranston, K., Waters, D. B., & Hsu, J. (2019). Association between receipt of a medically tailored meal program and health care use. *JAMA Internal Medicine*, *179*(6), 786. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2019.0198>
- Bertagnolli, C., Espindola, A. P. D., Kleinübing, S. J., Tasić, L., & Da Silva, M. G. C. (2014). Sargassum filipendula alginate from Brazil: Seasonal influence and characteristics. *Carbohydrate Polymers*, *111*, 619–623. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.05.024>

- Bessière, J. (1998). Local development and heritage : traditional food and cuisine as a tourist attractions in rural areas. *HAL (Le Centre Pour La Communication Scientifique Directe)*. <https://hal-univ-tlse2.archives-ouvertes.fr/hal-01465013>
- Blumenthal, H. (2009). *The Fat Duck Cookbook*. Bloomsbury Publishing PLC.
- Brenner, M. P., & Sørensen, P. M. (2015). Biophysics of Molecular Gastronomy. *Cell*, *161*(1), 5–8. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2015.03.002>
- Bryce, R., Guajardo, C., Ilarraza, D., Milgrom, N., Pike, D., Savoie, K., Valbuena, F., & Miller-Matero, L. R. (2017). Participation in a farmers' market fruit and vegetable prescription program at a federally qualified health center improves hemoglobin A1C in low income uncontrolled diabetics. *Preventive Medicine Reports*, *7*, 176–179. <https://doi.org/10.1016/j.pmedr.2017.06.006>
- Bubin, S. F. A., Ali, S. M., Shukri, R., Ibadullah, W. Z. W., Ramli, N. S., Mustapha, N. A., & Ismail-Fitry, M. R. (2019). Characterization and stability of pitaya pearls from hydrocolloids by reverse spherification. *International Journal of Food Properties*, *22*(1), 1353–1364. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1647234>
- Cao, L., Lü, W., Mata, A., Nishinari, K., & Fang, Y. (2020). Egg-box model-based gelation of alginate and pectin: A review. *Carbohydrate Polymers*, *242*, 116389. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116389>
- Caporaso, N., & Formisano, D. (2015). Developments, applications, and trends of molecular gastronomy among food scientists and innovative chefs. *Food Reviews International*, *32*(4), 417–435. <https://doi.org/10.1080/87559129.2015.1094818>
- Castells, P. E. (2021). QCooking and Science Workshops: The “Soft of the World”, Gelling Agents. In *CRC Press eBooks* (pp. 651–653). <https://doi.org/10.1201/9780429168703-99>
- Celep, G. S., Demirkaya, A., & Solak, E. K. (2022). Antioxidant and anticancer activities of gallic acid loaded sodium alginate microspheres on colon cancer. *Current Applied Physics*, *40*, 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2020.06.002>

- Cerciello, A., Gaudio, P., Granata, V., Sala, M., Aquino, R. P., & Russo, P. (2017). Synergistic effect of divalent cations in improving technological properties of cross-linked alginate beads. *International Journal of Biological Macromolecules*, *101*, 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.077>
- Chan, L. W., Lee, H. Y., & Heng, P. W. S. (2006). Mechanisms of external and internal gelation and their impact on the functions of alginate as a coat and delivery system. *Carbohydrate Polymers*, *63*(2), 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.07.033>
- Chandler, D. E., & Roberson, R. W. (2009). *Bioimaging: Current Concepts in Light and Electron Microscopy*. Jones & Bartlett Publishers.
- Ching, S. H., & Bansal, N. (2015). Alginate gel particles—A review of production techniques and physical properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *57*(6), 1133–1152. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.965773>
- Chrastil, J. (1991). Gelation of calcium alginate. Influence of rice starch or rice flour on the gelation kinetics and on the final gel structure. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *39*(5), 874–876. <https://doi.org/10.1021/jf00005a012>
- Chuang, J. J., Huang, Y., Lo, S. H., Hsu, T. F., Huang, W. Y., Huang, S. L., & Lin, Y. S. (2017). Effects of pH on the shape of alginate particles and its release behavior. *International Journal of Polymer Science*, *2017*, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2017/3902704>
- Clark, A. H. (1996). Biopolymer gels. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, *1*(6), 712–717. [https://doi.org/10.1016/s1359-0294\(96\)80072-0](https://doi.org/10.1016/s1359-0294(96)80072-0)
- Clementi, F., Fantozzi, P., Mancini, F., & Moresi, M. (1995). Optimal conditions for alginate production by *Azotobacter vinelandii*. *Enzyme and Microbial Technology*, *17*(11), 983–988. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(95\)00007-0](https://doi.org/10.1016/0141-0229(95)00007-0)
- Collins, T. (2007). ImageJ for microscopy. *BioTechniques*, *43*(1S), S25–S30. <https://doi.org/10.2144/000112517>

- Cousins, J., O’Gorman, K. D., & Stierand, M. (2010). Molecular gastronomy: cuisine innovation or modern day alchemy? *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 22(3), 399–415. <https://doi.org/10.1108/09596111011035972>
- Cuadros, T. R., Skurtys, O., & Aguilera, J. M. (2012). Mechanical properties of calcium alginate fibers produced with a microfluidic device. *Carbohydrate Polymers*, 89(4), 1198–1206. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.03.094>
- Da Cruz, C. M., Maestrelli, S. C., Pugine, S. M. P., Sorce, A. R., & Da Silva Rigo, E. C. (2023). Addition of sodium alginate capsules containing *Lysinibacillus sphaericus* for self-healing of cracks in mortars. *Research, Society and Development*, 12(3), e4612340331. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i3.40331>
- D’Angelo, G., Hansen, H. N., & Hart, A. J. (2016). Molecular gastronomy meets 3D printing: layered construction via reverse spherification. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 3(3), 152–159. <https://doi.org/10.1089/3dp.2016.0024>
- De Castro Spadari, C., Da Silva De Bastiani, F. W. M., Lopes, L. B., & Ishida, K. (2019). <p>Alginate nanoparticles as non-toxic delivery system for miltefosine in the treatment of candidiasis and cryptococcosis</p> *International Journal of Nanomedicine, Volume 14*, 5187–5199. <https://doi.org/10.2147/ijn.s205350>
- De Farias, Y. B., & Noreña, C. P. Z. (2019). Reverse encapsulation using double controlled gelification for the production of spheres with liquid light soy sauce-core. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 16, 100137. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2019.100137>
- De Silva, S. S. M., & Kumar, N. S. (1984). Carbohydrate constituents of the marine algae of Sri Lanka part ii. composition and sequence of uronate residues in alginates from some brown seaweeds. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 12(2), 161. <https://doi.org/10.4038/jnsfsr.v12i2.8353>
- Del Pilar, J. L. M. (2019). *Estudios de encapsulación de polifenoles del té: Propiedades y estabilidad*. Universidad De Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/36905>

- Dobrinčić, A., Balbino, S., Zorić, Z., Pedišić, S., Kovačević, D. B., Garofulić, I. E., & Dragović-Uzelac, V. (2020). Advanced technologies for the extraction of marine brown algal polysaccharides. *Marine Drugs*, 18(3), 168. <https://doi.org/10.3390/md18030168>
- Downer, S., Berkowitz, S. A., Harlan, T. S., Olstad, D. L., & Mozaffarian, D. (2020). Food is medicine: actions to integrate food and nutrition into healthcare. *BMJ*, m2482. <https://doi.org/10.1136/bmj.m2482>
- Dufresne, W., & Meehan, P. (2017). *wd~50: The Cookbook*. Anthony Bourdain/Ecco.
- Escandell-Comesaña, J. (2021, January 1). *Efecto De Saborizantes En La Esferificacion Inversa De Un Modelo De Coctel*. Document - Gale Academic OneFile. <https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE%7CA663462497&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=08644497&p=AONE&sw=w>
- Evageliou, V. (2000). Effect of pH, sugar type and thermal annealing on high-methoxy pectin gels. *Carbohydrate Polymers*, 42(3), 245–259. [https://doi.org/10.1016/s0144-8617\(99\)00191-5](https://doi.org/10.1016/s0144-8617(99)00191-5)
- Faculty of Hotel & Tourism Management, UiTM Pulau Pinang. (2019, July). *Reverse spherification technique / Farhan Faat and Mohamad Farhan Azmi - UiTM Institutional Repository*. <https://ir.uitm.edu.my/id/eprint/78652/>
- Fang, Y., Al-Assaf, S., Phillips, G. O., Nishinari, K., Funami, T., Williams, P. A., & Li, L. (2007). Multiple steps and critical behaviors of the binding of calcium to alginate. *Journal of Physical Chemistry B*, 111(10), 2456–2462. <https://doi.org/10.1021/jp0689870>
- Farrés, I. F., Douaire, M., & Norton, I. T. (2013). Rheology and tribological properties of Ca-alginate fluid gels produced by diffusion-controlled method. *Food Hydrocolloids*, 32(1), 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.12.009>

- Farrés, I. F., & Norton, I. T. (2014). Formation kinetics and rheology of alginate fluid gels produced by in-situ calcium release. *Food Hydrocolloids*, 40, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.02.005>
- Ferguson, P. P. (2004). *Accounting for taste: The Triumph of French Cuisine*. University of Chicago Press.
- Fernando, I. P. S., Lee, W., & Han, E. J. (2020). Alginate-based nanomaterials: Fabrication techniques, properties, and applications. *Chemical Engineering Journal*, 391, 123823. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123823>
- García-Teneche, M., & Novell, J. M. F. (2019). Refreshing Popular Science Through Molecular Cuisine. *Edulearn Proceedings*. <https://doi.org/10.21125/edulearn.2019.2507>
- Gibbs, W. W., & Myhrvold, N. (2011). Spherical eats. *Scientific American*, 305(4), 28. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican1011-28a>
- Gómez, C. G., Lambrecht, M. V. P., Lozano, J., Rinaudo, M., & Villar, M. A. (2009). Influence of the extraction–purification conditions on final properties of alginates obtained from brown algae (*Macrocystis pyrifera*). *International Journal of Biological Macromolecules*, 44(4), 365–371. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2009.02.005>
- Grant, G. T., Morris, E. R., Rees, D. A., Smith, P. J., & Thom, D. (1973). Biological interactions between polysaccharides and divalent cations: The egg-box model. *FEBS Letters*, 32(1), 195–198. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(73\)80770-7](https://doi.org/10.1016/0014-5793(73)80770-7)
- Gu, Y., Yang, S., Zhu, G., Yang, Y., Qu, Q., Wang, Y., & Zheng, H. (2018). The effects of cross-linking cations on the electrochemical behavior of silicon anodes with alginate binder. *Electrochimica Acta*, 269, 405–414. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.02.168>
- Hall, C. M. (2006). Introduction: Culinary Tourism and Regional Development: From Slow food to Slow tourism? *Tourism Review International*, 9(4), 303–305. <https://doi.org/10.3727/154427206776330580>

- Hall, M., & Gößling, S. (2013). Sustainable Culinary Systems. Local Foods, Innovation, and Tourism & Hospitality. In *Routledge eBooks*. <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BB13400669>
- Harte, F., & Venegas, R. (2010). A MODEL FOR VISCOSITY REDUCTION IN POLYSACCHARIDES SUBJECTED TO HIGH-PRESSURE HOMOGENIZATION. *Journal of Texture Studies*, *41*(1), 49–61. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2009.00212.x>
- Hartmann, M., Dentini, M., Draget, K. I., & Skjåk-Bræk, G. (2006). Enzymatic modification of alginates with the mannuronan C-5epimerase AlgE4 enhances their solubility at low pH. *Carbohydrate Polymers*, *63*(2), 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.08.052>
- Haug, A., Lårsen, B., Samuelsson, B., Sjövall, J., & Munch-Petersen, J. (1963). The solubility of alginate at low pH. *Acta Chemica Scandinavica*, *17*, 1653–1662. <https://doi.org/10.3891/acta.chem.scand.17-1653>
- Haug, A., Larsen, B., Smidsrød, O., & Munch-Petersen, J. (1963). The degradation of alginates at different pH values. *Acta Chemica Scandinavica*, *17*, 1466–1468. <https://doi.org/10.3891/acta.chem.scand.17-1466>
- Hecht, H., & Srebnik, S. (2016). Structural characterization of sodium alginate and calcium alginate. *Biomacromolecules*, *17*(6), 2160–2167. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.6b00378>
- Hentati, F., Delattre, C., Ursu, A., Desbrières, J., Cerf, D. L., Gardarin, C., Abdelkafi, S., Michaud, P., & Pierre, G. (2018). Structural characterization and antioxidant activity of water-soluble polysaccharides from the Tunisian brown seaweed *Cystoseira compressa*. *Carbohydrate Polymers*, *198*, 589–600. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.098>
- Hernández-González, A. C., Téllez-Jurado, L., & Rodríguez-Lorenzo, L. M. (2020). Alginate hydrogels for bone tissue engineering, from injectables to bioprinting: A

- review. *Carbohydrate Polymers*, 229, 115514. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115514>
- Hirst, E. L., Jones, J., & Jones, W. O. (1939). 389. The structure of alginic acid. Part I. *Journal of the Chemical Society*, 1880. <https://doi.org/10.1039/jr9390001880>
- Hoffman, J. (2009). Q&A: Chemistry in the kitchen. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/457267a>
- Hu, M., Zheng, G., Zhao, D., & Wu, Y. (2020). Characterization of the structure and diffusion behavior of calcium alginate gel beads. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(31). <https://doi.org/10.1002/app.48923>
- Ispiryan, L., Heitmann, M., Hoehnel, A., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2019). Optimization and validation of an HPAEC-PAD method for the quantification of FODMAPs in cereals and Cereal-Based products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(15), 4384–4392. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00382>
- Ivanovic, S. (2011). *Molecular gastronomy in function of scientific implementation in practice*. <https://www.econstor.eu/handle/10419/105312>
- Javvaji, V., Baradwaj, A. G., Payne, G. F., & Raghavan, S. R. (2011). Light-Activated ionic gelation of common biopolymers. *Langmuir*, 27(20), 12591–12596. <https://doi.org/10.1021/la201860s>
- Jeong, C., Kim, S., Lee, C., Cho, S., & Kim, S. (2020). Changes in the Physical Properties of Calcium Alginate Gel Beads under a Wide Range of Gelation Temperature Conditions. *Foods*, 9(2), 180. <https://doi.org/10.3390/foods9020180>
- Jiao, W., Chen, W., Mei, Y., Yun, Y., Wang, B., Zhong, Q., & Chen, H. (2019). Effects of molecular weight and guluronic Acid/Mannuronic acid ratio on the rheological behavior and stabilizing property of sodium alginate. *Molecules*, 24(23), 4374. <https://doi.org/10.3390/molecules24234374>
- Jiménez-Regalado, E. J., Díaz-Cruz, C. A., & Aguirre-Loredo, R. Y. (2021). Physicochemical Characterization of Mixiote Paper: a Natural Film of Vegetable Origin Used in

- Traditional Mexican Gastronomy. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 6902–6908. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1941479>
- Johnson, H. (2019). From “Meat Culture” to “Cultured Meat”: Critically evaluating the contested ontologies and transformative potential of biofabricated animal material on culture and law. *M/C Journal*, 22(2). <https://doi.org/10.5204/mcj.1504>
- Kawada, A., Hiura, N., Tajima, S., & Takahara, H. (1999). Alginate oligosaccharides stimulate VEGF-mediated growth and migration of human endothelial cells. *Archives of Dermatological Research*, 291(10), 542–547. <https://doi.org/10.1007/s004030050451>
- Khajehie, N., Niakousari, M., Eskandari, M. H., Majdinasab, M., & Shekarfroush, S. S. (2023). Microencapsulation of Lacticaseibacillus rhamnosus GG and L. plantarum 299 V by reverse spherification: a promising method to improve the survival of probiotics. *PubMed*, 76(1). <https://doi.org/10.1093/lambio/ovac025>
- Khajouei, R. A., Keramat, J., Hamdami, N., Ursu, A., Delattre, C., Laroche, C., Gardarin, C., Cerf, D. L., Desbrières, J., Djelveh, G., & Michaud, P. (2018). Extraction and characterization of an alginate from the Iranian brown seaweed *Nizimuddinia zanardini*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118, 1073–1081. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.154>
- Kiple, K. F., & Ornelas, K. C. (2001). The Cambridge World History of Food. *Food Service Technology*, 1(1), 61–62. <https://doi.org/10.1046/j.1471-5740.2001.00006.x>
- Köhn, R. (1975). Ion binding on polyuronates - alginate and pectin. *Pure and Applied Chemistry*, 42(3), 371–397. <https://doi.org/10.1351/pac197542030371>
- Kumar, S., & Sahoo, D. (2017). A comprehensive analysis of alginate content and biochemical composition of leftover pulp from brown seaweed *Sargassum wightii*. *Algal Research*, 23, 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.02.003>
- Lársen, B., Salem, D. M., Sallam, M. A., Mishrikey, M. M., & Beltagy, A. (2003). Characterization of the alginates from algae harvested at the Egyptian Red Sea

- coast. *Carbohydrate Research*, 338(22), 2325–2336. [https://doi.org/10.1016/s0008-6215\(03\)00378-1](https://doi.org/10.1016/s0008-6215(03)00378-1)
- Lee, P., & Rogers, M. A. (2012). Effect of calcium source and exposure-time on basic caviar spherification using sodium alginate. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 1(2), 96–100. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2013.06.003>
- Leo, W. J., McLoughlin, A. J., & Malone, D. M. (1990). Effects of sterilization treatments on some properties of alginate solutions and gels. *Biotechnology Progress*, 6(1), 51–53. <https://doi.org/10.1021/bp00001a008>
- Li, J., Wu, Y., He, J., & Huang, Y. (2016). A new insight to the effect of calcium concentration on gelation process and physical properties of alginate films. *Journal of Materials Science*, 51(12), 5791–5801. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9880-0>
- Li, Y., Liang, M., Dou, X., Feng, C., Pang, J., Cheng, X., Liu, H., Liu, T., Wang, Y., & Chen, X. (2019). Development of alginate hydrogel/gum Arabic/gelatin based composite capsules and their application as oral delivery carriers for antioxidant. *International Journal of Biological Macromolecules*, 132, 1090–1097. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.103>
- Liu, X. D., Yu, W., Zhang, Y., Xue, W., Xiong, Y., J, X., Chen, Y., & Yuan, Q. (2002). Characterization of structure and diffusion behaviour of Ca-alginate beads prepared with external or internal calcium sources. *Journal of Microencapsulation*, 19(6), 775–782. <https://doi.org/10.1080/0265204021000022743>
- Liu, Y., Liang, P., Zhang, H., & Guo, D. (2006). Cation-Controlled aqueous dispersions of Alginic-Acid-Wrapped Multi-Walled carbon nanotubes. *Small*, 2(7), 874–878. <https://doi.org/10.1002/sml.200600099>
- Low, Y. L., & Pui, L. P. (2020). Optimization of mango-pineapple jelly sphere production by frozen reverse spherification using a full factorial design [pdf]. *Acta Scientiarum Polonorum*, 19(2), 207–218. <https://doi.org/10.17306/j.afs.2020.0752>

- Lucía, C., Ferrándiz, M., & López, A. (2017). Encapsulation of almond essential oil by Co-Extrusion/Gelling using chitosan as wall material. *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, 07(01), 67–74. <https://doi.org/10.4236/jeas.2017.71004>
- Luck, L. A. (2021). Spherification. In *CRC Press eBooks*. <https://doi.org/10.1201/9780429168703-81>
- Mancini, F., & McHugh, T. H. (2000). Fruit-alginate interactions in novel restructured products. *Nahrung*, 44(3), 152–157. [https://doi.org/10.1002/1521-3803\(20000501\)44:3](https://doi.org/10.1002/1521-3803(20000501)44:3)
- McClements, D. J. (1998). *Food Emulsions: Principles, practice, and techniques*. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA71684511>
- McClements, D. J. (2017). Designing biopolymer microgels to encapsulate, protect and deliver bioactive components: Physicochemical aspects. *Advances in Colloid and Interface Science*, 240, 31–59. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.12.005>
- McGee, H. (2004). *On food and cooking: The Science and lore of the Kitchen*. Scribner.
- McGee, H. (2012). *Keys to good cooking: A Guide to Making the Best of Foods and Recipes*. National Geographic Books.
- Mohammed, A., Rivers, A., Stuckey, D. C., & Ward, K. (2020). Alginate extraction from Sargassum seaweed in the Caribbean region: Optimization using response surface methodology. *Carbohydrate Polymers*, 245, 116419. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116419>
- Mushanganyisi, D., De Wit, M., Du Toit, A., Du Toit, L., Bothma, C., Hugo, A., & Venter, S. (2022). Functional properties of cactus pear mucilage: gelling and spherification. *Acta Horticulturae*, 1343, 505–510. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2022.1343.63>
- Myhrvold, N., Young, C., Bilet, M., & Smith, R. M. (2011). *Modernist Cuisine: the art and science of cooking*. <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BB06825442>
- Nai-Yu, Z., Zhang, Y., Fan, X., & Han, L. (1994). Effects of composition and structure of alginates on adsorption of divalent metals. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 12(1), 78–83. <https://doi.org/10.1007/bf02845476>

- Nazha, H. (2020). Investigating the potential use of polymeric materials in the preparation of temporary cosmetic teeth painting veneers. *Materials Research Express*, 7(7), 075307. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aba709>
- Nestle, M. (2007). *Food Politics: How the food industry Influences nutrition, and Health, Revised and expanded edition*. <https://www.amazon.com/Food-Politics-Influences-Nutrition-California/dp/0520254031>
- Ng, L., & Simmons, R. (1999). Infrared spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 71(12), 343–350. <https://doi.org/10.1021/a1999908r>
- Nott, K. P., & Hall, L. J. (2008). Heating of foods studied by magnetic resonance imaging. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 83(1), 78–82. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450830114>
- Oates, C., & Ledward, D. (1990). Studies on the effect of heat on alginates. *Food Hydrocolloids*, 4(3), 215–220. [https://doi.org/10.1016/s0268-005x\(09\)80154-9](https://doi.org/10.1016/s0268-005x(09)80154-9)
- O'Brien, N. (2013, August 1). *Near infrared spectroscopic authentication of seafood*. <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=jnirs-21-4-299>
- Otilio, O. a. O. (2022, December 14). *Sferificación de pure deshidratado de sachapapa morada (Dioscorea Trífida L.) enriquecida con Spirulina para escolares como prevención de la Anemia Ferropénica*. <http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/7788>
- Park, D., Cheng, J., Park, J. B., Shin, S., Lee, S. H., Hong, B. H., Kim, S. H., Hyun, J., & Yang, C. (2019). PH-Triggered silk Fibroin/Alginate structures fabricated in aqueous Two-Phase system. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 5(11), 5897–5905. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.9b01216>
- Parreidt, T. S., Müller, K., & Schmid, M. (2018). Alginate-Based edible films and coatings for food packaging applications. *Foods*, 7(10), 170. <https://doi.org/10.3390/foods7100170>

- Paulo, B. B., De Melo Ramos, F., Feliciano, M. D., Prado, D. P., Silveira, M. P., Alvim, I. D., & Prata, A. S. (2022). Spherification of hydrocolloids by jet cutter. *Journal of Culinary Science & Technology*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/15428052.2022.2077877>
- Peschardt, W. (1942, April 15). *US2403547A - Manufacture of artificial edible cherries, soft sheets, and the like* - Google Patents. <https://patents.google.com/patent/US2403547A/en>
- Petruzzelli, A. M., & Savino, T. (2014). Search, Recombination, and Innovation: Lessons from Haute Cuisine. *Long Range Planning*, 47(4), 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2012.09.001>
- Phillips, G. O., & Williams, P. (2009). Handbook of hydrocolloids. In *Woodhead Publishing Limited eBooks*. <https://doi.org/10.1533/9781845695873>
- Ponce, N. M., & Stortz, C. A. (2020). A comprehensive and comparative analysis of the fucoidan compositional data across the Phaeophyceae. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.556312>
- Precup, G., Mitrea, L., Călinoiu, L. F., Martău, A. G., Nemeș, A., Teleky, B. E., Coman, V., & Vodnar, D. C. (2021). Food processing by-products and molecular gastronomy. In *Elsevier eBooks* (pp. 137–163). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820057-5.00008-x>
- Precup, G., Pacurar, A., Călinoiu, L. F., Mitrea, L., Rusu, B., Szabo, K., Bindea, M., Ștefănescu, B., & Vodnar, D. C. (2018). 29. Ethical perspectives on molecular gastronomy: food for tomorrow or just a food fad? *Professionals in Food Chains*. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-869-8_29
- Provost, J., Colabroy, K. L., Kelly, B. S., & Wallert, M. (2016). *The Science of Cooking: Understanding the biology and chemistry behind food and cooking*. <https://www.amazon.com/Science-Cooking-Understanding-Biology-Chemistry/dp/1118674200>

- Puguan, J. M. C., Yu, X., & Kim, H. (2014). Characterization of structure, physico-chemical properties and diffusion behavior of Ca-Alginate gel beads prepared by different gelation methods. *Journal of Colloid and Interface Science*, *432*, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.06.048>
- Rehm, B. H. A., & Valla, S. (1997). Bacterial alginates: biosynthesis and applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *48*(3), 281–288. <https://doi.org/10.1007/s002530051051>
- Rezvanian, M., Ahmad, N., Amin, M. C. I. M., & Ng, S. (2017). Optimization, characterization, and in vitro assessment of alginate-pectin ionic cross-linked hydrogel film for wound dressing applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, *97*, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.12.079>
- Riddick, F., Wallace, E., & Davis, J. (2016). Managing risks due to ingredient variability in food production. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, *121*, 17. <https://doi.org/10.6028/jres.121.002>
- Roca, J., Roca, J., & Roca, J. (2016). *El Cellar de Can Roca: Redux Edition*. Grub Street Cookery.
- Sacchi, R., Paduano, A., Savarese, M. F., Vitaglione, P., & Fogliano, V. (2013). Extra virgin olive oil: From composition to “Molecular Gastronomy.” In *Cancer treatment and research* (pp. 325–338). https://doi.org/10.1007/978-3-642-38007-5_19
- ŞahiN, E. (2022). A bibliometric overview of the International Journal of Gastronomy and Food Science: To where is gastronomy research evolving? *International Journal of Gastronomy and Food Science*, *28*, 100543. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100543>
- Sanchez-Ballester, N. M., Soulairol, I., Bataille, B., & Sharkawi, T. (2019). Flexible heteroionic calcium-magnesium alginate beads for controlled drug release. *Carbohydrate Polymers*, *207*, 224–229. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.096>

- Saraswathi, S. J., Babu, B., & Rengasamy, R. (2003). Seasonal studies on the alginate and its biochemical composition I: *Sargassum polycystum* (Fucales), Phaeophyceae. *Phycological Research*, 51(4), 240–243. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1835.2003.tb00191.x>
- Sari-Chmayssem, N., Taha, S., Mawlawi, H., Guégan, J., Jeftić, J., & Benvegnu, T. (2015). Extracted and depolymerized alginates from brown algae *Sargassum vulgare* of Lebanese origin: chemical, rheological, and antioxidant properties. *Journal of Applied Phycology*, 28(3), 1915–1929. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0676-4>
- Schmid, R., & McGee, H. F. (1989). On Food and Cooking: the science and lore of the kitchen. *TAXON*, 38(3), 446. <https://doi.org/10.2307/1222284>
- Sellimi, S., Younes, I., Ayed, H. B., Maâlej, H., Montero, V., Rinaudo, M., Dahia, M., Mechichi, T., Hajji, M., & Nasri, M. (2015). Structural, physicochemical and antioxidant properties of sodium alginate isolated from a Tunisian brown seaweed. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 1358–1367. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.10.016>
- Sen, D. J. (2017, January 1). *Cross linking of calcium ion in alginate produce spherification in molecular gastronomy by pseudoplastic flow*. <https://wjpsonline.com/index.php/wjps/article/view/335>
- Serna-Gallén, P., Fortuño-Morte, M., & Beltrán-Mir, H. (2022). “MasterChemist”: A novel strategy for reviewing stoichiometry and introducing molecular gastronomy to chemistry students. *Journal of Chemical Education*, 99(10), 3443–3451. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00250>
- Short, M. P. (2012, March 22). *US9320297B2 - Spherification/reverse spherification automated and integrated system and method* - Google Patents. <https://patents.google.com/patent/US9320297B2/en>
- Silva, V. (2023). Exploring Spherification with Some Foods of the Mediterranean Diet. *www.cetjournal.it*. <https://doi.org/10.3303/CET23102046>

- Singh, N., & Bagade, P. (2022). Quality, Food Safety and Role of Technology in Food Industry. *Thermal Food Engineering Operations*, 415–454. <https://doi.org/10.1002/9781119776437.ch14>
- Sonego, J. M., Santagapita, P. R., Perullini, M., & Jobbágy, M. (2016). Ca(ii) and Ce(iii) homogeneous alginate hydrogels from the parent alginic acid precursor: a structural study. *Dalton Transactions*, 45(24), 10050–10057. <https://doi.org/10.1039/c6dt00321d>
- Strobel, S. A., Hudnall, K., Arbaugh, B., Cunniffe, J., Scher, H. B., & Jeoh, T. (2019). Stability of Fish Oil in Calcium Alginate Microcapsules Cross-Linked by In Situ Internal Gelation During Spray Drying. *Food and Bioprocess Technology*, 13(2), 275–287. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02391-y>
- Stuart, B. H. (2005). Infrared spectroscopy. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. <https://doi.org/10.1002/0471238961.0914061810151405.a01.pub2>
- Sun, Q., Zhang, Z., Zhang, R., Gao, R., & McClements, D. J. (2018). Development of functional or medical foods for oral administration of insulin for diabetes treatment: gastroprotective edible microgels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(19), 4820–4826. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00233>
- Suo, X., Pompei, F., Bonfini, M., Mustafa, A. M., Sagratini, G., Wang, Z., & Vittadini, E. (2023). Quality of wholemeal pasta made with pigmented and ancient wheats. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 31, 100665. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100665>
- Talaver, I. (2014). *Molecular gastronomy*. <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/14612>
- This, H. (2006). *Molecular Gastronomy*. In *Columbia University Press eBooks*. <https://doi.org/10.7312/this13312>
- This, H. (2008). *Molecular Gastronomy: Exploring the Science of Flavor*. Arts and Traditions of the Table: Perspectives on Culinary History.

- This, H. (2009). *Building a meal: From Molecular Gastronomy to Culinary Constructivism*. Columbia University Press.
- This, H. (2016). *Note-by-Note cooking: The Future of Food*. Arts and Traditions of the Table.
- This, H., & Rutledge, D. N. (2009). Analytical methods for molecular gastronomy. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 394(3), 659–661. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-2764-2>
- Topuz, F., Henke, A., Richtering, W., & Gröll, J. (2012). Magnesium ions and alginate do form hydrogels: a rheological study. *Soft Matter*, 8(18), 4877. <https://doi.org/10.1039/c2sm07465f>
- Torres, M. R., De Sousa, A. P. A., Filho, E. a. S., Melo, D. F., Feitosa, J. P., De Paula, R. C., & Lima, M. G. (2007). Extraction and physicochemical characterization of Sargassum vulgare alginate from Brazil. *Carbohydrate Research*, 342(14), 2067–2074. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2007.05.022>
- Tsai, F., Chiang, P., Kitamura, Y., Kokawa, M., & Islam, M. Z. (2017). Producing liquid-core hydrogel beads by reverse spherification: Effect of secondary gelation on physical properties and release characteristics. *Food Hydrocolloids*, 62, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.07.002>
- Tsai, F., Kitamura, Y., & Kokawa, M. (2017). Liquid-core alginate hydrogel beads loaded with functional compounds of radish by-products by reverse spherification: Optimization by response surface methodology. *International Journal of Biological Macromolecules*, 96, 600–610. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.12.056>
- Vainiotalo, S., & Matveinen, K. (1993). Cooking Fumes As A Hygienic Problem In The Food And Catering Industries. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 54(7), 376–382. <https://doi.org/10.1080/15298669391354838>
- Van Leusden, P., Hartog, G. D., Bast, A., Postema, M., Van Der Linden, E., & Sagis, L. M. (2017). Permeation of probe molecules into alginate microbeads: Effect of salt and

- processing. *Food Hydrocolloids*, 73, 255–261. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.06.028>
- Vanommeslaeghe, K., Hatcher, E., Acharya, C., Kundu, S. C., Zhong, S., Shim, J., Darian, E., Guvench, O., Lopes, P. E. M., Vorobyov, I., & MacKerell, A. D. (2009). CHARMM general force field: A force field for drug-like molecules compatible with the CHARMM all-atom additive biological force fields. *Journal of Computational Chemistry*, 31(4), 671–690. <https://doi.org/10.1002/jcc.21367>
- Vega, C., Castells, P. E., Ubbink, J., & Van Der Linden, E. (2012). Four. spherification. faux caviar and skinless ravioli. In *Columbia University Press eBooks*. <https://doi.org/10.7312/vega15344-005>
- Vega, C., & Ubbink, J. (2008). Molecular gastronomy: a food fad or science supporting innovative cuisine? *Trends in Food Science and Technology*, 19(7), 372–382. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.01.006>
- Vega, C., Ubbink, J., & Van Der Linden, E. (2013). *The kitchen as laboratory: Reflections on the Science of Food and Cooking*. Columbia University Press.
- Vilgis, T. A. (2015). Soft matter food physics—the physics of food and cooking. *Reports on Progress in Physics*, 78(12), 124602. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/78/12/124602>
- Vold, I. M. N., Kristiansen, K. A., & Christensen, B. E. (2006). A Study of the Chain Stiffness and Extension of Alginates, in Vitro Epimerized Alginates, and Periodate-Oxidized Alginates Using Size-Exclusion Chromatography Combined with Light Scattering and Viscosity Detectors. *Biomacromolecules*, 7(7), 2136–2146. <https://doi.org/10.1021/bm060099n>
- Vollath, D., Wedemeyer, H., Günther, E., & Elbel, H. (1989). Semi-industrial production of SiO_2 powder and spheres. *Fusion Engineering and Design*, 8, 415–419. [https://doi.org/10.1016/s0920-3796\(89\)80141-3](https://doi.org/10.1016/s0920-3796(89)80141-3)
- Vu, H. C., Dwivedi, A. D., Le, T. T., Seo, S., Kim, Y. H., & Chang, Y. S. (2017). Magnetite graphene oxide encapsulated in alginate beads for enhanced adsorption of Cr(VI) and

- As(V) from aqueous solutions: Role of crosslinking metal cations in pH control. *Chemical Engineering Journal*, 307, 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.058>
- Wang, B., Wan, Y., Zheng, Y., Lee, X., Liu, T., Yu, Z., Huang, J., Ok, Y. S., Chen, J., & Gao, B. (2018). Alginate-based composites for environmental applications: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(4), 318–356. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1547621>
- Xing, M., Cao, Q., Wang, Y., Han, X., Zhao, J., Zhang, Q., Ji, A., & Song, S. (2020). Advances in research on the bioactivity of alginate oligosaccharides. *Marine Drugs*, 18(3), 144. <https://doi.org/10.3390/md18030144>
- Yang, J., Steck, J., & Suo, Z. (2020). Gelation kinetics of alginate chains through covalent bonds. *Extreme Mechanics Letters*, 40, 100898. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.100898>
- Yokose, T., Nishikawa, T., Yamamoto, Y., Yamasaki, Y., Yamaguchi, K., & Oda, T. (2009). Growth-Promoting Effect of Alginate Oligosaccharides on a Unicellular Marine Microalga, *Nannochloropsis oculata*. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 73(2), 450–453. <https://doi.org/10.1271/bbb.80692>
- Young, C., & Bilet, M. (2011). *Modernist cuisine: The Art and Science of Cooking*.
- Zazzali, I., Aguirre-Calvo, T. R., Ruiz-Henestrosa, V. M. P., Santagapita, P. R., & Perullini, M. (2019). Effects of pH, extrusion tip size and storage protocol on the structural properties of Ca(II)-alginate beads. *Carbohydrate Polymers*, 206, 749–756. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.051>
- Zhang, X., Wang, X., Fan, W., Liu, Y., Wang, Q., & Weng, L. (2022). Fabrication, property and Application of calcium alginate fiber: a review. *Polymers*, 14(15), 3227. <https://doi.org/10.3390/polym14153227>
- Zhang, Y., Yin, H., Zhao, X., Wang, W., Du, Y., He, A., & Sun, K. (2014). The promoting effects of alginate oligosaccharides on root development in *Oryza sativa* L. mediated

by auxin signaling. *Carbohydrate Polymers*, 113, 446–

454. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.06.079>

罗司丹, 陈慧凌, 王兆梅. (2020). Process for producing flavored liquid-core hydrogel beads

by reverse spherification. *xdspkj.ijournals.cn*. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673->

9078.2020.3.025