



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
CIUDAD UNIVERSITARIA DE TULANCINGO



MAESTRÍA EN CIENCIA DE LOS ALIMENTOS

TESIS

“Efecto de la adición de almidón de *Dioscorea bulbifera* L. sobre las propiedades texturales, reológicas y el índice glucémico *in vitro* del yogurt natural”.

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencia de los Alimentos

PRESENTA

I.A. Ángel Noé Pacheco Amador

Director

Dr. Rubén Jiménez Alvarado

Codirector

Dr. Martín Amador Meza Nieto

Comité revisor:

Dr. Gabriel Aguirre Álvarez

Dr. Antonio de Jesús Cenobio Galindo

Tulancingo de Bravo, Hgo., México, Junio 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Institute of Agricultural Sciences

Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos

Academic Area of Agroindustrial engineering and Food Engineering

Asunto: Autorización de impresión de tesis

El Comité Tutorial de la Tesis titulada "Efecto de la adición de almidón de *Dioscorea bulbifera* L. sobre las propiedades texturales, reológicas y el índice glucémico *in vitro* del yogurt natural", realizada por el sustentante Ángel Noé Pacheco Amador con **número de cuenta 296370** perteneciente al programa de **Maestría en Ciencia de los Alimentos**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional, y de acuerdo con lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos establecidos en el Reglamento de Estudios de Posgrado para la defensa oral en el examen de grado correspondiente.

Atentamente

"Amor, Orden y Progreso"

Tulancingo de Bravo, Hidalgo, a 26 de mayo de 2026

El Comité Tutorial

Dr. Rubén Jiménez Alvarado

Director

Dr. Martín Amador Meza Nieto

Codirector

Dr. Gabriel Aguirre Alvarez

Miembro del comité

Dr. Antonio de Jesús Cenobio Galindo

Miembro del comité

"Amor, Orden y Progreso"

Av. Universidad No. 133, Col. San Miguel Huatengo, Santiago
Tulantepec. C.P. 43775. Hidalgo, Mexico.

Teléfono: 7717172000 Ext. 42021

ricardo_navarro@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx



Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a mi esfuerzo y dedicación que han permitido la elaboración de la presente investigación, de igual manera a todos los doctores que me acompañaron todos los días, guiándome por el camino de la investigación y experimentación, resolviendo todas mis dudas y cuestionamientos. A mis padres, amigos, compañeros y mi compañera de vida, los cuales son mi apoyo más importante, demostrándome cariño y apoyo incondicional, sin importar nuestras diferencias de pensamientos y opiniones, por brindarme el apoyo moral en todo momento, de antemano muchas gracias.

Pacheco Amador Ángel Noé

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada, con CVU 1319024, la cual fue de gran apoyo para la continuidad de mis estudios. Asimismo, extendiendo mi agradecimiento a la casa de estudios, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, centrándome en el Instituto de Ciencias Agropecuarias, por acompañarme en mi formación y fortalecerme académicamente para iniciar con oportunidades de éxito.

De igual manera, muestro mi gratitud para todas esas personas que me ayudaron de alguna manera en la realización de esta meta académica, de este proceso de aprendizaje tan importante para mí, agradecer su presencia, palabras motivadoras, conocimientos compartidos, consejos y la dedicación, empeño e interés que mostraron.

Expreso mi profundo agradecimiento a mis asesores, quienes brindaron conocimiento y guía, lo cual hizo posible estructurar este trabajo.

A mi compañera de vida quien a través del tiempo fuimos estableciendo conexión, por estar presente este tiempo, compartiendo experiencias, alegrías, frustraciones, tristezas, peleas, celebraciones, por brindarme confianza y por crecer juntos en este proyecto, muchas gracias.

Por último, quiero agradecer a la base de todo, a mi familia por los consejos y motivación.

Ángel Noé Pacheco Amador.

Resumen.

El almidón es el polisacárido que más se ha utilizado en la industria alimentaria, debido a sus propiedades tecnofuncionales, por lo que fue de interés para esta investigación buscar almidones de fuentes no convencionales como *Dioscorea bulbifera* L. Por lo que fue de interés para esta investigación buscar almidones de fuentes no convencionales, que pudieran ser utilizadas en alimentos y que tuvieran reportes en la literatura de tener un contenido relativamente alto de almidón resistente, con el propósito de reducir la ingesta calórica de los alimentos a los que se adicionen y evitar contribuir al desarrollo de enfermedades no transmisibles como la diabetes. Por lo anterior, este estudio le dio un valor agregado al cultivo subutilizado de *Dioscorea bulbifera* L., conocida como papa de aire, utilizando su almidón tanto en forma nativa como modificada con anhídrido octenil succínico (OSA). Se utilizó como aditivo alimentario en la preparación de yogur natural, estabilizándolo frente a sinéresis. Para ello, se compararon yogures formulados con 0.8, 1.0 y 1.2 % de almidón de *Dioscorea bulbifera* L. nativo y modificado, usando como control negativo yogurt estabilizado con un estabilizante comercial (Palsgaard PM 0111) al 1% p/p, y como control positivo yogurt sin estabilizante. El almidón se obtuvo de la parte comestible de los bulbillos de *Dioscorea bulbifera* L. La modificación se realizó químicamente con OSA 3% p/p. Se determinó el grado de sustitución, el análisis químico proximal del almidón nativo y modificado, y el contenido de almidón resistente (AR) usando los métodos estándar de la AOAC. De igual forma se determinó la capacidad de retención de agua (CRA) y el índice de solubilidad en agua (ISA). El rendimiento de obtención del almidón de *Dioscorea bulbifera* L. fue de 13.17% en base seca. El grado de sustitución (GS) fue $0.0174 \pm 0.0012\%$. De los resultados del análisis químico proximal se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) respecto a los niveles de proteína, presentando el almidón modificado valores de $0.1740 \pm 0.0002\%$, aproximadamente la mitad que el almidón nativo. El contenido de AR fue de $72.14 \pm 0.92\%$ para el almidón nativo y $69.27 \pm 0.08\%$ para el almidón modificado. La CRA (11.6206 ± 0.0276 g agua/g muestra) e ISA ($12.6206 \pm 0.0276\%$) del almidón modificado fueron significativamente mayores ($P \leq 0.05$) a partir de 70 °C. Estas características hicieron al almidón modificado de *Dioscorea bulbifera* L. un buen candidato a ser utilizado como estabilizante en alimentos donde se necesite que la capacidad de retención de agua sea buena y que el contenido de almidón resistente sea elevado. El análisis de pH presentó una disminución en todos los tratamientos respecto al día 0 con el día 21 de almacenamiento, debido a la actividad fermentativa de las bacterias ácido-lácticas. Las formulaciones con yogurt modificado en concentraciones de 1.0 y 1.2 %, mostraron valores de pH más estables (4.0-4.5). La acidez titulable presentó un incremento

a partir del día 14 y posteriormente se estabilizó, apreciando mayores valores en los tratamientos con almidón modificado. Respecto a sinéresis las formulaciones de yogurt con almidón modificado con concentraciones de 1.0 y 1.2 % presentaron menores porcentajes de desuerado y mayor estabilidad, mostrando mejor retención de suero durante el almacenamiento, atribuida a la formación de una red proteína-almidón. Los parámetros de textura mostraron que la adición de almidón modificado mejoró significativamente la firmeza, consistencia, cohesividad y trabajo de cohesión del yogurt. Las formulaciones de yogurt con almidón modificado con concentraciones de 1.0 y 1.2 %, presentaron mayor estabilidad a lo largo del tiempo. El análisis reológico mostró que los tratamientos con almidón modificado exhibieron una red estructural más estable, favoreciendo la resistencia al esfuerzo. La viscosidad aparente disminuyó con el incremento de la velocidad de corte, característico del comportamiento no newtoniano del yogurt. El tratamiento con yogurt modificado al 1.2 % mostró un perfil de viscosidad más equilibrado y estable. En el estudio de digestión *in vitro* el tratamiento con yogurt modificado al 1.2 % destacó por combinar una liberación inicial moderada y una digestión intestinal progresiva, lo que sugiere un potencial uso en productos con bajo índice glucémico. La digestión *in vitro* en fases gástrica e intestinal permitió evaluar la liberación de fructosa, glucosa e inulina. La fructosa mostró una liberación baja y variable a lo largo del proceso, destacando el tratamiento Yogurt con almidón nativo al 0.8 % (YAN0.8) durante la digestión y Yogurt con almidón modificado al 0.8 % (YAM0.8) al finalizarla, mientras que varios tratamientos no presentaron liberación detectable. En contraste, la glucosa fue el azúcar predominante, con concentraciones elevadas en tratamientos como Yogurt con almidón nativo al 1.0 % (YAN1.0) y Yogurt con almidón modificado al 1.2 % (YAM1.2), lo que sugiere una menor presencia de almidón resistente. Otros tratamientos, como Control positivo (CP), Control negativo (CN) y Yogurt con almidón modificado al 0.8 % (YAM0.8), exhibieron liberación reducida o más estable. En el caso de la inulina, se observaron incrementos principalmente tardíos, destacando el tratamiento de Yogurt con almidón modificado al 1.2 % (YAM1.2), que presentó una liberación progresiva y controlada, lo cual indica un posible efecto funcional. En conjunto, los resultados evidencian diferencias en la digestibilidad y en los patrones de liberación de azúcares, aspectos que pueden influir en el impacto nutricional de los tratamientos evaluados.

Abstract.

Starch is the most widely used polysaccharide in the food industry due to its techno-functional properties; therefore, this study focused on identifying starches from non-conventional sources such as *Dioscorea bulbifera* L. Therefore, this study focused on identifying starches from non-conventional sources that could be used in food products and that, according to the literature, have a relatively high resistant starch content, with the aim of reducing the caloric intake of the foods to which they are added and preventing the development of noncommunicable diseases such as diabetes. Consequently, this study added value to the underutilized crop *Dioscorea bulbifera* L., known as “air potato,” by using its starch in both its native form and in a form modified with octenylsuccinic anhydride (OSA). It was used as a food additive in the preparation of plain yogurt, stabilizing it against syneresis. To this end, yogurts formulated with 0.8, 1.0, and 1.2% native and modified *Dioscorea bulbifera* L. starch were compared, using as a negative control yogurt stabilized with a commercial stabilizer (Palsgaard PM 0111) at 1% w/w, and as a positive control yogurt without a stabilizer. The starch was obtained from the edible part of the tubers of *Dioscorea bulbifera* L. The modification was performed chemically using 3% w/w OSA. The degree of substitution, the proximate chemical analysis of the native and modified starch, and the resistant starch (RS) content were determined using standard AOAC methods. Similarly, the water-holding capacity (WHC) and the water solubility index (WSI) were determined. The starch yield from *Dioscorea bulbifera* L. was 13.17% on a dry basis. The degree of substitution (DS) was $0.0174 \pm 0.0012\%$. The proximate chemical analysis results showed statistically significant differences ($P \leq 0.05$) in protein levels, with the modified starch exhibiting values of $0.1740 \pm 0.0002\%$, approximately half that of the native starch. The AR content was $72.14 \pm 0.92\%$ for native starch and $69.27 \pm 0.08\%$ for modified starch. The CRA (11.6206 ± 0.0276 g water/g sample) and ISA ($12.6206 \pm 0.0276\%$) of the modified starch were significantly higher ($P \leq 0.05$) at temperatures of 70 °C and above. These characteristics made the modified starch from *Dioscorea bulbifera* L. a good candidate for use as a stabilizer in foods where good water-holding capacity and high resistant starch content are required. pH analysis showed a decrease in all treatments compared to day 0 by day 21 of storage, due to the fermentative activity of lactic acid bacteria. The formulations containing modified yogurt at concentrations of 1.0% and 1.2% showed more stable pH values (4.0–4.5). Titratable acidity increased starting on day 14 and subsequently stabilized, with higher values observed in the treatments containing modified starch. With regard to syneresis, the yogurt formulations containing modified starch at concentrations of 1.0% and 1.2% exhibited lower whey separation rates and greater stability, demonstrating better whey retention during storage, which was attributed to the formation of a protein-starch network. Texture

parameters showed that the addition of modified starch significantly improved the firmness, consistency, cohesiveness, and workability of the yogurt. Yogurt formulations containing modified starch at concentrations of 1.0% and 1.2% exhibited greater stability over time. Rheological analysis showed that the modified starch treatments exhibited a more stable structural network, enhancing stress resistance. Apparent viscosity decreased with increasing shear rate, a characteristic of the yogurt's non-Newtonian behavior. The treatment with 1.2% modified yogurt showed a more balanced and stable viscosity profile. In the in vitro digestion study, the treatment with 1.2% modified yogurt stood out for combining moderate initial release with progressive intestinal digestion, suggesting potential use in low-glycemic-index products. In vitro digestion in gastric and intestinal phases allowed for the evaluation of the release of fructose, glucose, and inulin. Fructose showed low and variable release throughout the process, with the Yogurt with 0.8% native starch ($Y_{AN0.8}$) treatment standing out during digestion and the Yogurt with 0.8% modified starch ($Y_{AM0.8}$) treatment at the end of digestion, while several treatments showed no detectable release. In contrast, glucose was the predominant sugar, with high concentrations in treatments such as Yogurt with 1.0% native starch ($Y_{AN1.0}$) and Yogurt with 1.2% modified starch ($Y_{AM1.2}$), suggesting a lower presence of resistant starch. Other treatments, such as Positive Control (CP), Negative Control (CN), and Yogurt with 0.8% modified starch ($Y_{AM0.8}$), exhibited reduced or more stable release. In the case of inulin, increases were observed mainly in the later stages, with the Yogurt with 1.2% modified starch ($Y_{AM1.2}$) treatment standing out, as it exhibited a progressive and controlled release, indicating a possible functional effect. Overall, the results demonstrate differences in digestibility and sugar release patterns, aspects that may influence the nutritional impact of the evaluated treatments.

Índice.

Resumen.	1
Abstract.	3
1. Introducción.	8
2. Revisión de literatura	11
2.1. Almidón.	11
2.2. Almidón resistente.	13
2.3. Almidón como agente funcional en sistemas alimentarios.....	14
2.4. Modificación del almidón con OSA.	15
2.5. Almidón de fuentes no convencionales.	18
2.6. <i>Dioscorea bulbifera</i> L.....	18
2.7. Yogurt.	19
2.8. Propiedades reológicas.	21
3. Justificación.	23
4. Hipótesis.	24
5. Objetivos.	24
5.1 Objetivo general.....	24
5.2 Objetivos específicos.....	24
6. Materiales y Métodos.....	25
6.1. Material vegetal.	25
6.2. Identificación del material vegetal.	25
6.3. Obtención del almidón de <i>Dioscorea bulbifera</i> L.	26
6.4. Modificación del almidón de <i>Dioscorea bulbifera</i> L. con Anhídrido Octenil Succínico.....	27
6.5. Determinación del grado de sustitución del almidón y eficiencia de reacción... 28	
6.7. Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR).	28
6.8. Determinación del almidón resistente en <i>Dioscorea bulbifera</i> L.	28
6.9. Análisis químico proximal del almidón nativo y modificado de <i>Dioscorea bulbifera</i> L.	30
6.10. Capacidad de retención de agua CRA e Índice de solubilidad en agua ISA....	32
6.11. Formulación de las muestras de yogurt.....	33
6.12. Análisis de pH.	34
6.13. Acidez titulable.	34

6.14. Sinéresis.....	34
6.15. Medición de textura.....	35
6.16. Análisis reológico.	35
6.17. Viscosidad aparente.	36
6.18. Modelo <i>in vitro</i> de estimación del índice glucémico en muestras de yogurt.....	36
6.19. Determinación de glucosa, fructosa y sacarosa por método de HPLC.....	36
6.20. Análisis estadístico.....	37
7. Resultados y Discusión.....	37
7.1. Rendimiento de almidón de bulbillos de <i>Dioscorea bulbifera</i> L.....	37
7.2. Modificación química de almidón nativo de <i>Dioscorea bulbifera</i> L.	37
7.3 Espectros de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR).	39
7.4. Determinación de almidón resistente (AR) en almidón nativo y modificado de <i>Dioscorea bulbifera</i> L.....	41
7.5. Análisis químico proximal de almidón nativo y modificado de <i>Dioscorea bulbifera</i> L.....	42
7.6. Capacidad de retención de agua CRA.....	43
7.7. Índice de solubilidad del almidón de <i>Dioscorea bulbifera</i> L. en agua (ISA).	44
7.8. Análisis de pH en formulaciones de yogurt.....	46
7.9. Acidez titulable.	47
7.10. Sinéresis en formulaciones de yogurt.....	48
7.11. Parámetros de textura en la formulación de yogurt.	49
7.12. Análisis reológico.	55
7.13. Viscosidad aparente en formulaciones de yogurt.	57
7.14. Estimación del índice glucémico <i>in vitro</i> , en muestras de yogurt.....	59
8. Conclusiones.....	63
9. Referencias.....	64

Índice de tablas

Tabla 1 Antecedentes de investigación de almidones modificados con OSA.....	22
Tabla 2 Antecedentes de investigación de la adición de almidones en yogurt.....	23
Tabla 3 Porcentaje de almidón resistente en almidón nativo y químicamente modificado de <i>Dioscorea bulbifera</i> L.	42
Tabla 4 Análisis químico proximal de almidón de nativo y químicamente modificado de <i>Dioscorea bulbifera</i> L.	43

Tabla 5 Análisis de parámetros de textura en formulaciones de yogurt.	51
Tabla 6 Análisis de parámetros de textura en formulaciones de yogurt día 0.	51
Tabla 7 Análisis de parámetros de textura en formulaciones de yogurt día 7.	52
Tabla 8 Análisis de parámetros de textura en formulaciones de yogurt día 14.	53
Tabla 9 Análisis de parámetros de textura en formulaciones de yogurt día 21.	54
Tabla 10 Concentración carbohidratos simples libres, susceptibles de ser absorbidos en las muestras de yogurt.....	62

Índice de figuras

Figura 1 Mecanismo de reacción del OSA con el almidón.	17
Figura 2 Gráfica del grado de sustitución. Promedio de tres repeticiones $\pm$ desviación estándar. Letras diferentes en cada barra indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos a cada tiempo ($P \leq 0.05$) por Tukey.	39
Figura 3 Espectros de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR) de almidón nativo AN y modificado AM de Dioscorea bulbifera L. con 3% de OSA por 6 horas (AM3.0;6). Se muestra un zoom para observar los cambios presentes en la modificación en los números de onda 1726 y 1552 cm^{-1}	41
Figura 4 Gráfica de CRA, donde AM es el almidón modificado y AN almidón nativo. Letras diferentes entre tratamientos a la misma temperatura indican diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$) por t student.....	44
Figura 5 Gráfica de ISA, donde AM es el almidón modificado y AN almidón nativo. Letras diferentes entre tratamientos a la misma temperatura indican diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$) por t student.....	45
Figura 6 Efecto de la utilización de estabilizantes sobre la acidez titulable (%) y el pH del yogurt durante el almacenamiento.....	47
Figura 7 Efecto del tipo de estabilizante sobre sinéresis del yogurt durante el almacenamiento.	49
Figura 8 Gráfica de ISA, donde AM es el almidón modificado y AN almidón nativo. Letras diferentes entre tratamientos a la misma temperatura indican diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$). Por t de Student.....	56
Figura 9 Gráfica de ISA, donde AM es el almidón modificado y AN almidón nativo. Letras diferentes entre tratamientos a la misma temperatura indican diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$). Por t de student.	57
Figura 10 Gráfica de ISA, donde AM es el almidón modificado y AN almidón nativo. Letras diferentes entre tratamientos a la misma temperatura indican diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$). Por t de Student.....	59

1. Introducción.

El Almidón es considerado un homopolímero formado de dos subunidades, amilopectina y amilosa. La amilosa es la fracción lineal del almidón conformada por moléculas de glucosa, las cuales se unen por enlaces glucosídicos alfa-1,4. La amilopectina es considerada la fracción ramificada, constituida por moléculas de glucosa unidas mediante enlaces glucosídicos alfa-1,4 que se ramifican con enlaces glucosídicos alfa-1,6. El almidón nativo se encuentra empaquetado en forma de gránulos, formando un sistema polimérico semicristalino, la cristalinidad varía dependiendo de la especie, esta puede ser de 15 a 45%, y se le atribuye a las cadenas cortas lineales de la amilopectina, que forman dobles hélices, dando lugar a estructuras cristalinas tridimensionales, que permiten tener función de solubilidad, hinchamiento, gelatinización y retrogradación (Romero *et al.*, 2016).

Las propiedades físicas y químicas que presenta el almidón se diferencian dependiendo de la fuente donde fue obtenido. Si este se obtuvo de gránulos de maíz, trigo, arroz o de tubérculos se le conoce como almidón convencional, por el contrario, si proviene de un material vegetal inusual, recibe el nombre de almidón no convencional. *Dioscorea bulbifera* L. es considerada una planta medicinal cuya raíz ha sido utilizada tradicionalmente en el tratamiento de diversas afecciones, entre ellas conjuntivitis, diarrea y disentería. Asimismo, se le atribuyen propiedades para mejorar la memoria, reducir la fiebre, retardar el envejecimiento, tratar forúnculos, favorecer la cicatrización de heridas, aliviar el dolor de garganta y contribuir al manejo de la diabetes mellitus tipo II y del cáncer de mama. Esta especie se caracteriza por la presencia de bulbillos en la axila de sus hojas, los cuales son conocidos coloquialmente como “papa de aire” o “papa de burro” en diversas regiones de Centroamérica y en zonas tropicales de la República Mexicana (Odeghe, Adikwu, & Ojiego, 2020). Dentro de las especies de *Dioscorea*, los bulbillos de la *Dioscorea bulbifera* L. son unos de los más consumidos en la dieta asiática, comúnmente se consumen asados, sin embargo presentan un sabor amargo y salado, pero con un valor nutricional alto (Odeghe, Adikwu, & Ojiego, 2020). Estos bulbillos son una fuente potencial no convencional de almidón que puede ser aprovechado para su uso como aditivo alimentario. Este almidón ya ha sido previamente caracterizado por Hernández-Uribe *et al.*, (2020).

Los almidones en su forma nativa poseen baja resistencia térmica y baja resistencia al cizallamiento, y tienden a retrogradarse, por esta razón no son muy utilizados como aditivos en la industria y se prefiere utilizarlos modificados. La aplicación del almidón nativo o modificado depende por lo tanto de la función tecnológica que se requiera en un alimento. El tipo de modificación puede

ser física, química o enzimática. El almidón nativo se puede someter a modificaciones químicas que introduzcan grupos funcionales en sus moléculas (Mutahi & Miura, 2020).

Dentro de los almidones químicamente modificados, los que presentan mayor interés en la industria alimentaria y no alimentaria, son aquellos que se han sometido a una sustitución de los grupos hidroxilo mediante esterificación. Dependiendo de factores como concentración y tiempo de reacción, se logrará obtener almidones modificados con diferentes grados de sustitución de los OH de la molécula de glucosa en el almidón. El límite de esterificación del almidón es 3, debido a que cada unidad de glucosa tiene 3 hidroxilos disponibles, lo que permite modular la actividad superficial del almidón (León-Méndez *et al.*, 2020).

Entre los compuestos más aprovechados en la modificación química se encuentra el Anhídrido Octenil Succínico OSA. Según datos recabados de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO la utilización de OSA para la modificación química de los almidones no debe exceder del 3 % p/p con respecto al almidón seco. Utilizando OSA se genera una reacción de esterificación hidrofóbica de la molécula de almidón, donde se remplazan grupos OH (hidroxilo) del almidón por grupos funcionales del OSA, dando lugar a un almidón esterificado químicamente con OSA que tendrá grupos hidrofílicos e hidrofóbicos en su estructura, permitiendo su adsorción en interfases agua-aceite, por lo que puede funcionar como un estabilizante (Estrada-Fernández *et al.*, 2021).

Estas modificaciones permiten aprovechar el almidón resistente presente en la materia vegetal. El almidón resistente se considera un componente dietético funcional para mantener la salud metabólica y del colon en estado óptimo, de igual manera puede ayudar a prevenir o controlar la diabetes mellitus tipo II. Hay una relación inversa entre el almidón resistente y el índice glucémico, ya que el almidón resistente presenta un índice glucémico bajo. El almidón modificado y almidón resistente ha tomado relevancia en la fabricación de yogurt como agente gelificante, estabilizante o espesante, aumentando su viscosidad, mejorando sus propiedades texturales, reduciendo sinéresis y mejorando la sensación en boca (Wong *et al.*, 2020).

El yogurt es un alimento lácteo con gran popularidad en la población. Debido a su composición mejora la salud de sus consumidores, proporciona calcio, grasas de alta calidad y bacterias ácido-lácticas que actúan como probióticos. El gran aumento de consumo en los años más recientes ha llevado a las industrias a evolucionar y cambiar sus propiedades sensoriales de lo que es esta bebida láctea fermentada, mejorando propiedades texturales, en particular, firmeza del gel y una mejor viscosidad (Wong *et al.*, 2020).

Dentro de las expectativas positivas de los usuarios al consumir un yogurt que puede definir su calidad, es que tenga una textura agradable. En el proceso para la elaboración del yogurt es importante medir el contenido de sólidos totales para obtener un yogurt con mayor firmeza, combinando ingredientes lácteos y no lácteos para su homogenización. En el tratamiento térmico que recibe la leche para la obtención del yogurt la β -lactoglobulina, proteína presente en el suero de leche, se desnaturaliza formando agregados de proteínas de suero solubles con micelas de caseína, unidos por interacciones hidrofóbicas, interacciones electrostáticas y enlaces disulfuro durante la acidificación. Por otro lado, el almidón se gelatiniza cuando alcanza una cierta temperatura, lo que resulta en el hinchamiento de los gránulos de almidón. La interacción del gránulo de almidón hinchado y los agregados de proteína de suero con micelas de la caseína, producen una estructura de yogurt firme (Mutahi & Miura, 2020).

Unos de los problemas a solucionar en los productos lácteos fermentados, es el fenómeno físico de sinéresis durante el almacenamiento. La sinéresis se presenta por la separación del lactosuero del gel formado en la elaboración de yogurt, teniendo como materia expulsada la fase acuosa de la leche fermentada, agua atrapada dentro de las estructuras, agua ligada a las proteínas y el agua libre. La aparición de sinéresis es causada por diversos factores entre los que destaca los cultivos iniciadores utilizados, actividad proteolítica, velocidad de inoculación, tratamiento térmico, homogenización, y el proceso de enfriamiento. Por lo que una solución que emplea la industria láctea es la utilización de almidón nativo o modificado como estabilizante (Acevedo, Rodríguez, & Fernández, 2010; Arab *et al.*, 2023; He *et al.*, 2019)

Con base en lo anterior, un área de estudio actual se basa en la búsqueda de almidones que contengan altas fracciones de almidón resistente, que puedan ser incluidos en la dieta humana a través de la ingesta de alimentos procesados como el yogurt, sustituyendo a las fuentes de almidón convencional como maíz, trigo, papa, y arroz, con almidones de fuentes no convencionales, que presenten fibra dietética, lenta digestibilidad y bajo índice glucémico (Olayo-Contreras *et al.*, 2022).

Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo emplear un almidón modificado químicamente con OSA obtenido de una fuente no convencional, (*Dioscorea bulbifera* L.). Este almidón se utilizará para estabilizar un yogurt natural con un índice glucémico inferior al que presentan yogurts estabilizados con almidones modificados, gomas, grenetinas o estabilizantes industriales. Para ello, se realizarán ensayos *in vitro*.

2. Revisión de literatura

2.1. Almidón.

El almidón forma parte de las plantas, es uno de los biopolímeros renovables más abundante en la naturaleza, uno de los nutrientes principales en la dieta humana, se sintetiza en las hojas en el día, a partir del carbono fijado mediante el proceso de fotosíntesis y se moviliza por la noche con el fin de mantener la respiración, exportación de sacarosa y crecimiento. Es una fuente importante de carbono y de energía almacenada, el cual se sintetiza en el amiloplasto y el cloroplasto de las hojas verdes (Miao & BeMiller, 2023; Cho & Kang, 2020)

Una de las principales fuentes de reserva de energía de las plantas es el almidón, este forma parte de la alimentación de los seres vivos representando del 80 al 90% de los polisacáridos consumidos por los humanos. El almidón es un polisacárido de almacenamiento en las especies vegetales, está presente principalmente en cereales, legumbres y tubérculos. Es considerado un homopolímero compuesto por moléculas de glucosa, el cual funciona como producto de almacenamiento de energía en semillas y otros órganos, tiene un aporte del 80% en la ingesta calórica mundial, dentro de sus principales usos, son, dieta para animales y materia prima para industrias alimentarias. Es considerado uno de los componentes más importantes presentes en los sistemas alimentarios (Zhu & Liu, 2020).

De acuerdo con Chi *et al.*, (2021) el almidón se compone de una parte cristalina y otra amorfa, esto le permite tener regiones semi cristalinas. La región cristalina del almidón se encuentra formada por hélices simples y hélices dobles de unidades de amilosa y amilopectina, respectivamente. La parte interna es la que está relacionada entre el extremo reductor y las ramas exteriores en la amilopectina, formando las láminas amorfas en los gránulos de almidón. Por el contrario la parte externa es de donde están las ramas más exteriores hasta los extremos más reductores, formando las dobles hélices y cristales (Zhu & Liu, 2020). El almidón es un ingrediente muy utilizado en las industrias para la elaboración de distintos productos, gracias a sus características funcionales y nutricionales. La forma y tamaño de gránulo de almidón varía según la especie vegetal de donde se aísle. Las dimensiones del gránulo de almidón influyen específicamente en la tasa de digestión enzimática, que es la acción de las enzimas para hidrolizar la molécula de almidón, en sustancias de fácil adsorción y asimilación como la glucosa (Silveira & de Francisco, 2020).

El almidón se compone por dos unidades, amilosa y amilopectina. Las unidades de amilopectina están compuestas por cadenas cortas de tipo ramificada y las unidades de amilosa contienen cadenas lineales o ligeramente ramificadas. La amilosa es un polisacárido de glucosas

repetidas unidas por enlaces glucosídicos α -1,4 esto en un 99% , ya que también se han encontrado enlaces glucosídicos α -1,6 en un 1 %, lo que le proporciona su forma helicoidal en particular, por otro lado la amilopectina representa unidades repetidas de moléculas de glucosa las cuales se unen por enlaces glucosídicos α -1,4 con ramificaciones por enlaces glucosídicos α -1,6. El almidón presenta estructuras de múltiples escalas, como gránulos de almidón, anillos de crecimiento semi cristalinos, estructuras laminares, estructuras cristalinas, helicoidales y moleculares finas, debido a las interacciones amilosa-amilopectina (Chi *et al.*, 2021). El 98-99% del peso seco del almidón constituyen la amilosa y la amilopectina y el porcentaje restante lo ocupan proteínas, lípidos y minerales (fósforo, calcio, potasio, hierro, sodio, zinc, azufre, cobre y magnesio). Las unidades de α -D glucopiranososa son las unidades monoméricas del almidón. Las formas o conformaciones de muchos carbohidratos influyen en su reactividad, así como en las propiedades físicas de estos. Por lo que respecto a esto los monosacáridos existen principalmente en forma de piranososa de seis átomos de carbono. El almidón se biosintetiza en las células vegetales como en el endospermo de los cereales, los cotiledones de las leguminosas y en los tubérculos. El almidón presenta una estructura 3D compleja en la cual hay una pequeña composición química sin almidón que incluye proteínas, lípidos y polifenoles (Li *et al.*, 2021).

El grado de digestibilidad del almidón difiere en gran medida, y se ve afectado por la composición química, la fuente del almidón, el tamaño de los gránulos, tipo de procesamiento, y la relación amilosa/amilopectina. Dentro de los parámetros que afectan las propiedades funcionales del almidón son la relación amilosa-amilopectina, longitud de la cadena de amilopectina, tamaño y morfología de los gránulos, la densidad y las propiedades cristalinas. El contenido de amilosa que esté presente en el almidón influye en las propiedades fisicoquímicas y funcionales del almidón, así como su digestibilidad, teniendo almidón de rápida digestión, almidón de lenta digestión, y almidón resistente (Hernández-Urbe *et al.*, 2020).

Imbachí-Narváez *et al.* (2018) mencionan que las propiedades fisicoquímicas y funcionales de los almidones nativos vegetales están influenciados por sus estructuras granulares y moleculares. Las distintas aplicaciones del almidón varían con la relación Amilosa/Amilopectina (AM/AP), en los almidones más comunes la relación (AM/AP) es de un 25/75 %, en cuanto algunos almidones provenientes de guisantes el porcentaje de amilosa (AM) es de aproximadamente un 33 a 70% peso-peso (Ulbrich & Flöter, 2021). En los almidones de cereales más comunes, la relación (AM/AP) es de 180 y 330 g/kg para la amilosa y de 720 y 820 g/kg para amilopectina, dependiendo de la fuente vegetal de donde se aisló el almidón. La amilosa forma estructuras helicoidales, por lo que puede

sufrir hidrólisis enzimática, por el contrario la amilopeptina al estar muy ramificada, es más susceptible a la degradación enzimática (De Farias *et al.*, 2021).

El almidón tiene distintas funciones en la industria, ha aumentado el empleo de almidón como aditivo en la formulación de productos alimentarios y no alimentarios, teniendo funciones como un aglutinante, espesante, encapsulante, y coadyuvante gracias a sus propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales (Otegbayo *et al.*, 2024). La funcionalidad de los almidones depende de sus propiedades fisicoquímicas como gelatinización y retrogradación, y además de sus propiedades funcionales como absorción de agua, solubilidad, hinchamiento, y las características mecánicas de sus pastas y geles (Pérez *et al.*, 2021).

2.2. Almidón resistente.

La digestibilidad es una de las funciones que más se ha estudiado en el almidón, que depende de factores como el tamaño granular y la morfología, las propiedades de hinchamiento, la longitud de la cadena de amilopeptina, el contenido de amilosa, contenido de azúcar simple, cristalinidad relativa, complejos de amilosa-lípido e interacción entre las cadenas de almidón. Dependiendo de la digestibilidad del almidón se puede clasificar como almidón de rápida digestión (ARD), almidón de lenta digestión (ALD) y almidón resistente (AR). El ARD mantiene los niveles más altos de glucosa en sangre. El almidón resistente permanece indigestible después del período de digestión que tiene un tiempo aproximado de 120 minutos en estómago. El almidón resistente actúa como un prebiótico para los microorganismos benéficos que habitan en el intestino grueso, regula la absorción de minerales, la acumulación de grasas y la deposición de colesterol. Mantiene la condición de bajo índice glucémico y regula el nivel de glucosa en sangre, aumenta la saciedad, y mejora la digestión. Cuando el almidón resistente llega al intestino, sufre fermentación y produce ácidos grasos de cadena corta por ejemplo el ácido butírico. Esto reduce el pH y estimula el crecimiento de bacterias beneficiosas que habitan el intestino, ayuda a la eliminación de microorganismos dañinos del colon. Por lo que recientemente el almidón resistente es considerado como un alimento funcional que presenta un índice glucémico bajo (Yan *et al.*, 2022).

He *et al.* (2019) mencionan que el almidón resistente es considerado una fibra dietética, el cual es fermentado en el intestino grueso por bacterias probióticas dando efectos beneficiosos a los seres humanos. Aporta beneficios fisiológicos como lo es inhibir el aumento de glucosa en sangre, promoviendo la proliferación de bacterias intestinales saludables Jia *et al.* (2022). De acuerdo con su

origen, estructura y comportamiento frente a la digestión enzimática, el almidón resistente se clasifica en cinco tipos. El almidón resistente tipo 1 (RS1) corresponde al almidón físicamente inaccesible a la digestión, debido a que se encuentra incrustado en la matriz del alimento o protegido por la estructura celular. El almidón resistente tipo 2 (RS2) está constituido por gránulos de almidón nativos presentes en células y tejidos que no han sido gelatinizados, lo que impide su digestión por la amilasa humana. El almidón resistente tipo 3 (RS3) se refiere al almidón físicamente modificado o regenerado, el cual se forma como resultado de procesos de gelatinización seguidos de retrogradación. El almidón resistente tipo 4 (RS4) comprende almidones químicamente modificados, mientras que el almidón resistente tipo 5 (RS5) corresponde a complejos formados entre amilosa y lípidos, los cuales presentan una menor susceptibilidad a la hidrólisis enzimática (He *et al.*, 2019). La fibra dietética o también conocida como almidón resistente, se considera un buen prebiótico, pero además de eso se piensa que modula el índice glucémico en alimentos ricos en almidón, regulando los niveles de glucosa en sangre, ya que retrasa la acción de enzimas digestivas (Sadgrove, 2022).

En la actualidad el almidón con alto contenido de almidón resistente, es utilizado como un aditivo en la elaboración de yogurt, mejorando la consistencia, textura, y características sensoriales, debido a sus propiedades espesantes, de igual manera, puede actuar como una fuente de carbono para las bacterias ácido lácticas (BAL) en el proceso de fermentación (Jia *et al.*, 2022). El consumo de alimentos que contienen almidón resistente puede servir como fuente dietética importante para prevenir o controlar la diabetes. Existe una relación inversa entre el almidón resistente y el índice glucémico, ya que la cantidad de aporte en el índice glucémico del almidón resistente es baja, por lo que consumir alimentos que presenten mayor contenido de almidón resistente da como resultado concentraciones bajas de glucosa en sangre, una dieta con alimentos ricos en almidón resistente aumenta en gran medida la saciedad. Los alimentos con almidón resistente tienen digestión lenta con un índice glucémico más bajo. Son importantes en la dieta diaria ya que contribuyen a la prevención de enfermedades no transmisibles como obesidad, diabetes, enfermedades cardiovasculares, entre otras que representan una amenaza para el bienestar de los seres humanos (Bao *et al.*, 2022).

2.3. Almidón como agente funcional en sistemas alimentarios.

El almidón se encuentra entre los polisacáridos más comunes e importantes utilizados en la industria alimentaria, cumple funciones como gelificar, estabilizar, clarificar e inhibir la cristalización de la sacarosa como sustituto de grasas o emulsionante. Actualmente, las emulsiones juegan un papel importante en las formulaciones alimenticias, por ejemplo, en la elaboración de helados, refrescos,

postres, y salsas. Sin embargo, son sistemas termodinámicamente inestables. Esta inestabilidad se manifiesta a través de procesos fisicoquímicos como la separación gravitacional, floculación, coalescencia y maduración (Wiacek & Furmaniuk, 2024).

El almidón es uno de los agentes más utilizados para mejorar la textura de los productos alimentarios debido a sus propiedades fisicoquímicas, su facilidad de incorporación y su bajo costo. Entre sus funciones tecnológicas destacan su capacidad para espesar, gelificar y estabilizar sistemas alimentarios, así como para formar y mantener emulsiones, absorber humedad y evitar el apelmazamiento, actuar como aglutinante y contribuir al desarrollo de la textura en alimentos procesados. Estas características lo convierten en un ingrediente versátil y fundamental en diversas aplicaciones dentro de la industria alimentaria (Le Thanh-Blicharz & Lewandowicz, 2020).

Los emulsionantes y estabilizantes son utilizados para prevenir la precipitación de las proteínas en su punto isoelectrico, disminuyendo la separación del suero, y mejorando la textura. Se han usado almidones modificados para disminuir sinéresis y aumentar la firmeza, una desventaja de su uso es que pueden presentarse sabores extraños indeseables. El almidón es uno de los agentes más utilizados para mejorar la textura de los productos alimentarios debido a sus propiedades fisicoquímicas, su facilidad de incorporación y su bajo costo. Entre sus funciones tecnológicas destacan su capacidad para espesar, gelificar y estabilizar sistemas alimentarios, así como para formar y mantener emulsiones, absorber humedad y evitar el apelmazamiento, actuar como aglutinante y contribuir al desarrollo de la textura en alimentos procesados. Estas características lo convierten en un ingrediente versátil y fundamental en diversas aplicaciones dentro de la industria alimentaria. La aplicación del almidón como texturizante en yogurt batido oscila del 0.01% al 2%. El almidón modificado puede actuar como sustituto funcional de la grasa láctea, otorga beneficios a la salud del consumidor, mejora la viscosidad, y ayuda a la formación del gel mejorando la capacidad de retención de agua. El uso de almidones modificados puede disminuir la sinéresis en el yogurt y aumentar la firmeza durante el almacenamiento (Bravo-Núñez *et al.*, 2019; Imbachí-Narváez *et al.*, 2019).

En años recientes, ha crecido el consumo de productos ricos en proteínas debido a su alto valor nutricional, sabor, y textura. En México la alimentación es principalmente de cereales y legumbres, aunque el consumo de productos lácteos ha aumentado, por lo que se busca el consumo de alimentos funcionales que mejoren la actividad metabólica (Tovar & Herrera, 2017).

2.4. Modificación del almidón con OSA.

Los almidones pueden ser utilizados en su forma nativa, teniendo como desventaja algunas funcionalidades no deseadas, entre ellas alta higroscopicidad, rápido hinchamiento, pérdida de viscosidad, alta tendencia a la retrogradación, y poca resistencia al corte. Los almidones nativos son utilizados principalmente para producir pastas finas, elásticas y cohesivas (Silveira & de Francisco, 2020). Una desventaja de los almidones nativos es que tienen escasa resistencia cuando son sometidos a altas concentraciones de acidez, velocidad de corte, y un bajo grado de retrogradación. Por lo que se han realizado modificaciones moleculares al almidón, mediante reacciones químicas, cambiando las propiedades fisicoquímicas, teniendo una estructura granular con mayor estabilidad, mejor resistencia a tratamientos térmicos y la agitación (Pang *et al.*, 2019). Existen tres tipos de modificación las cuales son química, enzimática y física. Estas modificaciones ayudan a aprovechar sus propiedades tecnofuncionales y potencialmente prebióticas (Pang *et al.*, 2019; Silveira & de Francisco, 2020).

El Anhídrido Octenil Succínico (OSA) o también conocido como Anhídrido 2-octenilsuccínico, es un compuesto orgánico de fórmula química $C_{12}H_{18}O_3$. Peso molecular de 210.27 g/mol, una densidad de 1 g/mL a 25°C, punto de fusión de 8-12°C y un punto de ebullición de 168°C. Es un líquido incoloro soluble en disolventes orgánicos como etanol, éter y disulfuro de carbono. Se utiliza ampliamente en la síntesis orgánica como reactivos e intermedios. Puede dar lugar a la reacción de esterificación, de condensación, oxidación entre otras, también tiene la capacidad de sintetizar fragancias, colorantes y polímeros. El OSA generalmente es preparado mediante reacción de cloruro de acilo y octenol. Es considerado como un importante intermediario químico fino gracias a que su molécula contiene dobles enlaces carbono-carbono ligados a un ácido carboxílico (Zheng *et al.*, 2022).

El almidón modificado con OSA es sintetizado mediante una reacción de esterificación, que sustituye grupos OH presentes en las moléculas de glucosa que conforman el almidón por grupos OSA. Los grupos hidrófobos del OSA le imparten al almidón modificado. capacidad emulsionante, ya que introduce una fracción alquenoil hidrófoba y una fracción carboxilo hidrófila, adquiriendo una naturaleza anfifílica con propiedades tensoactivas. En comparación con el almidón nativo, el almidón esterificado con OSA genera grupos hidrófilos e introduce cadenas largas lipófilas, en consecuencia tiene buenas propiedades interfaciales y propiedades anfipáticas (Wang, Ji, Liu, & Peng, 2021).

Según información recabada por Imbachí-Narváez *et al.* (2019) el almidón esterificado con OSA tiene ventajas sobre emulsionantes convencionales como la goma arábica, caseína, y gelatina, principalmente por su bajo costo y fácil obtención. El OSA mejora las propiedades funcionales de almidón introduciendo un carácter anfifílico. Al almidón esterificado con OSA, se le da la aplicación en productos alimentarios, destacando la mejora de la fracción del almidón resistente, estabilización

de emulsiones y estabilización de películas comestibles, se atribuye a la alteración de la unión de la alfa amilasa lo que disminuye la digestión del almidón. La sustitución de OSA tiene lugar en la amilosa del almidón e intercalando en puntos de ramificación de las moléculas de la parte cristalina. Esta reacción por medio de esterificación es un proceso complicado, está relacionado con el contenido de amilosa, el tamaño del granulo y su estructura molecular. El contenido de amilosa está relacionado con el grado de sustitución, a mayor contenido de amilosa mayor grado de sustitución, y modifica las propiedades pastosas de los almidones modificados con OSA, por lo que la amilosa es el principal receptor de los grupos OSA en la modificación (Lopez-Silva *et al.*, 2019).

El mecanismo de reacción del OSA se da en condiciones alcalinas débiles en un pH de 8-8.5, donde los grupos hidroxilo activos del almidón son sustituidos por grupos hidrófobos del OSA para sintetizar octenil succinato de almidón. Se puede apreciar la fórmula de reacción en la Figura 1 (Wang *et al.*, 2021).

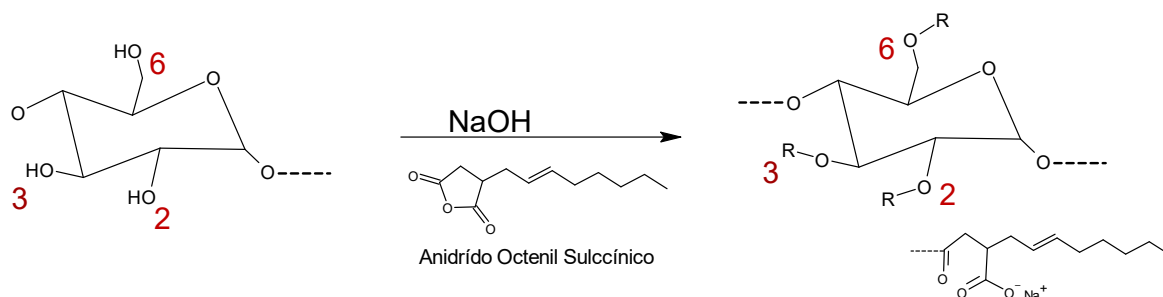


Figura 1 Mecanismo de reacción del OSA con el almidón.

Para medir las condiciones de la reacción de esterificación se toma en cuenta el grado de sustitución (GS) y la eficiencia de reacción (ER). El GS se considera el contenido medio de Anhídrido Octenil Succínico por unidad de almidón OSA, utilizado para indicar el grado de sustitución. El grado de sustitución GS de los almidones modificados con OSA es el número estimado de grupos hidroxilos de la molécula de glucosa presente en el almidón, remplazados por los grupos OSA por unidad de glucosa en el almidón. El GS es importante para definir tanto la capacidad emulsionante del almidón, la estabilidad de la emulsión y la digestibilidad del almidón. El almidón al tener una configuración macromolecular compleja es difícil para el OSA reaccionar completamente sobre la molécula de almidón, dando GS bajos (Lin *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2021).

El almidón modificado por esterificación se desnaturaliza por la introducción de los grupos OSA. El método de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se utiliza para estudiar los cambios en los grupos del almidón después de la modificación. Se genera vibración de estiramiento asimétrico del doble enlace alqueno (C = C) y éster carbonilo C = O, lo que significa

que el grupo hidroxilo activo del almidón y el anhídrido del ácido presentan una reacción de esterificación. En relación con el almidón nativo el espectro infrarrojo del almidón modificado con OSA tiene ondas de 1572 cm^{-1} y 1724 cm^{-1} y aparece un nuevo pico de absorción en 1726 cm^{-1} . La intensidad de los picos de absorción antes mencionados, es proporcional al grado de sustitución, y el pico 1726 cm^{-1} está relacionado con la intensidad de GS, este puede ayudar a medir el GS alto ($\geq 0,3$) (Wang *et al.*, 2021).

2.5. Almidón de fuentes no convencionales.

Los almidones que más se emplean en la industria alimentaria para la formulación de alimentos, son maíz, papa, trigo, y yuca, reciben el nombre de almidones de fuentes convencionales, las aplicaciones que tienen en la industria son como espesantes, estabilizantes, gelificantes, texturizadores y sustitutos de grasa. Por el contrario, a las fuentes no convencionales se han realizado investigaciones con resultados prometedores. Estos estudios fomentan el remplazo de las fuentes convencionales, tanto en la industria alimentaria como no alimentaria, por la incorporación de las fuentes no convencionales. Por lo que se han realizado estudios en almidones como camote, malanga, yuca y ñame (Nagai & Andrés, 2023; Roy & Kumar, 2023).

2.6. *Dioscorea bulbifera* L.

Las *Dioscoreas* o ñames son considerados una fuente de alimentos con aportes medicinales gracias a la presencia de compuestos bioactivos tales como dioscina, diosgenina, mucina, colina, alantoína, aminoácidos esenciales, y fibras dietéticas (Sahoo *et al.*, 2023). Son nutricionalmente importantes en la dieta humana, gracias a su valor energético y contenido de minerales como potasio, sodio, magnesio, calcio, cobre, zinc, fósforo, y hierro, así como también contiene vitaminas A, B, C, D, taninos, esteroides, sapogeninas y alcaloides (Silveira & de Francisco, 2020).

Dioscorea bulbifera L., pertenece a la gran flora presente en México, denominada comúnmente como papa de burro, es un bulbillo con sabor amargo salado, que se coloca al fuego durante 8 o 10 min para su posterior consumo, esto según un estudio realizado por Hernández-Uribe *et al.* (2020). Es una planta con tallos blandos no leñosos originaria de Asia y África, la cual se propaga con la ayuda de bulbos aéreos. Esta planta crece principalmente en regiones tropicales y subtropicales. Los bulbillos aéreos que produce la *Dioscorea bulbifera* L. tienen concentraciones altas de almidón, con gránulos de almidón pequeños y niveles de amilosa bajos (Bernardo *et al.*, 2018).

Las *Dioscoreas* ocupan el cuarto lugar entre los cultivos con mayor contenido de almidón, proteínas, fibra dietética, vitamina B6, vitamina C, potasio, manganeso, bajo en grasas saturadas y sodio, por lo que algunas especies del ñame son utilizadas con fines industriales y farmacéuticos. A pesar de su importancia en la industria alimentaria, se le han dedicado pocos esfuerzos a su estudio, mejoramiento, y aplicación. Nutricionalmente, los tubérculos subterráneos y bulbos aéreos de ñame (*Dioscoreas*) son ricos en vitaminas A, C y del complejo B (tiamina, riboflavina y niacina), fuente de carbohidratos y presentan niveles considerables de proteínas y lípidos. Es un género diverso morfológicamente con más de 600 especies distribuidas en distintas partes del mundo según lo reportado por Noda *et al.* (2020). El género *Dioscorea*, familia *Dioscoreaceae*, tiene 633 especies, conocidas como ñame, de las cuales aproximadamente 137 han sido previamente estudiadas. Estas plantas son muy resistentes ya que no requiere renovar la semilla, resiste falta de agua temporalmente, y es resistente a plagas y enfermedades (Silveira & de Francisco, 2020).

2.7. Yogurt.

Los productos fermentados derivados de la leche se consumen desde tiempos remotos, debido a que contienen grandes cantidades de lípidos, proteínas, carbohidratos y minerales. Un producto lácteo fermentado más antiguo y común es el yogurt, el cual se produce a partir de leche fermentada con cultivos iniciadores de *Streptococcus salivarius* spp. *Thermophilus* y *Lactobacillus delbruekii* spp. *Bulgaricus* que mediante la fermentación láctica homo fermentativa provocan la acidificación de la leche a partir de la producción de ácido láctico a base de la fermentación de la lactosa, esta acidificación genera una desnaturalización en las micelas de caseína, las cuales funcionan como emulsionantes en la leche, dando como resultado la formación del gel que brinda la textura del yogurt (Farag *et al.*, 2022). Bravo-Núñez *et al.*, (2019) mencionan que el yogurt es un gel copolimérico de glóbulos de grasa y caseína que forman una red tridimensional.

La interacción entre las (BAL) es un factor clave que determina la fermentación y la calidad del yogurt, dando como resultado mayor población bacteriana, una acidificación rápida, abundancia de compuestos volátiles aromáticos, y metabolitos no volátiles deseables para una buena calidad del yogurt. En el proceso de fermentación también se generan reacciones de degradación y oxidación enzimática, directamente en las grasas, proteínas y azúcares de la leche, que le confieren el sabor y olor característico al yogurt (Farag *et al.*, 2022).

La formación del gel proteico por la coagulación de la leche le brinda el sabor único al yogurt, la fuerza y dureza de este gel son importantes parámetros de calidad del yogurt, por otra parte cuando el pH comienza disminuir, la fuerza del gel aumenta (Yang *et al.*, 2021). Las proteínas presentes en el yogurt se degradan en péptidos y aminoácidos, la lactosa se hidroliza durante el proceso de fermentación de las bacterias ácido lácticas. Entre las características físicas del yogurt se encuentra la acidez titulable (TA), la cual no debe ser inferior al 0.9% expresada como ácido láctico. Otra característica son las bacterias activas del cultivo de yogurt que se recomienda un número total mínimo de 10^7 ufc/g. El yogurt es un alimento que contiene calcio, proteínas y grasas de alta calidad, así como cultivos bacterianos vivos, que son beneficiosos para el consumidor (Song & Aryana, 2014; Tovar & Herrera, 2017; Yang *et al.*, 2021).

Se producen más de 400 compuestos volátiles derivados de la composición química de la leche el proceso fermentativo y la adición de las bacterias ácido-lácticas. La generación de los compuestos volátiles depende de factores como tipo y composición de la leche, tipo y proporción de bacterias ácido lácticas, tiempo de incubación, y condiciones de procesamiento (Farag *et al.*, 2022). La tecnología de fermentación tiene influencia sobre la calidad del yogurt, en donde la temperatura puede afectar el crecimiento microbiano teniendo un impacto en las propiedades texturales del producto final, por ejemplo una mayor separación del suero, una red proteica frágil, menor dureza y viscosidad, afectando las propiedades sensoriales (Yang *et al.*, 2021). Como respuestas sensoriales y hedónicas del consumidor se encuentra la apariencia visual, la sensación en boca y el sabor que definen la calidad del producto (Greis *et al.*, 2023).

El yogurt cuajado es un producto lácteo fermentado, se produce mediante la acción de bacterias acidófilas, caracterizado por su acidez, textura gelificada y valor nutritivo. El 65% de las proteínas del yogurt cuajado son las caseínas, las cuales constan de cuatro proteínas principales α_1 , α_2 , β y κ -caseína. Las moléculas de κ -caseína están presentes principalmente fuera de la micela con la parte hidrófila del extremo C-terminal sobresaliendo de la superficie de la micela, formando una capa pilosa expandida. Las micelas de caseína del yogurt son regularmente esféricas, con tamaños que van de 50 a 300 nm de diámetro. Las micelas de caseína se estabilizan por dos factores importantes, es la estabilización estérica debido a la capa vellosa saliente de la capa de κ -caseína y el potencial zeta aproximadamente 20 mV a pH 6.7. En caso de que la capa pilosa no fuera lo suficientemente densa o que colapsara en la superficie, la estabilización estérica se debilitaría o se eliminaría por completo provocando la floculación y gelificación (Cui *et al.*, 2014).

El consumo de yogurt proporciona beneficios a la salud, debido a que tiene un pH bajo ya que contiene bacterias ácido lácticas las cuales mejoran el sistema inmunológico, y el tracto

gastrointestinal, controlando el síndrome del intestino irritable, enfermedades inflamatorias intestinales y suprimiendo patógenos endógenos y exógenos (Alhejaili *et al.*, 2019). La calidad del yogur se puede determinar utilizando indicadores sensoriales, fisicoquímicos y microbiológicos. Con la finalidad de satisfacer la producción del yogur y prevalecer la calidad durante el almacenamiento se buscan aditivos adecuados para el consumidor (He *et al.*, 2019). Los estabilizantes se añaden en productos lácteos para aumentar su viscosidad, estabilidad y atributos sensoriales (Hosseini & Ansari, 2019). Un estabilizante común utilizado para la producción de yogur es el almidón. En la fabricación de yogur batido se emplea almidón, esto con el fin de tener las propiedades texturales deseadas y prevenir la sinéresis. Los almidones modificados son utilizados comúnmente en la elaboración de yogur para mejorar la viscosidad, sensación en boca, aumentar el contenido de sólidos totales, prevenir la separación del suero, además que brinda una textura cremosa. Una manera de aumentar el contenido de sólidos totales o proteínas en el yogur es agregando estabilizadores como gelatina, inulina, gomas, fibras dietéticas y almidones modificados (Lee & Kang, 2024).

2.8. Propiedades reológicas.

Al estudio del comportamiento del flujo de los fluidos y el comportamiento de la deformación de los sólidos se le conoce como reología, este estudio puede proporcionar información sobre propiedades mecánicas, viscoelásticas y estructurales (Otegbayo *et al.*, 2024). Las propiedades térmicas como la temperatura de transición y las entalpías de gelatinización indican la fusión, cristianización y la temperatura de transición vítrea del almidón. Para el estudio de las propiedades reológicas se emplean principios de la reología.

La cuantificación de las propiedades viscosas se da en el módulo de pérdida de energía (G''), y las elásticas de algún material en las escalas de tiempo se denomina módulo de almacenamiento de energía (G'). Se denomina G' o módulo de almacenamiento a la medición de energía almacenada en un material cuando es sometido a un proceso de corte, representando el comportamiento elástico de la muestra. Por el contrario, para G'' es la energía utilizada, la cual se pierde en el ciclo de deformación sinusoidal, representa el comportamiento de la viscosidad en un material. La relación entre la porción viscosa y elástica, se da por el cociente del módulo de pérdida y el módulo de almacenamiento, conocido como tangente de pérdida o factor de amortiguación (Otegbayo *et al.*, 2023).

La viscosidad mínima es el valor de la viscosidad disminuida de la pasta de almidón debido a la descomposición de los gránulos a temperaturas más altas. Depende de la diferente susceptibilidad de tamaño de los gránulos de almidón durante un esfuerzo cortante y el cambio térmico. El almidón en la industria alimentaria puede actuar como viscosificante, espesante, estabilizante, gelificante, retenedor de agua y emulsionante en productos alimenticios que lo requieran. También se puede utilizar para reemplazar lípidos en productos alimenticios. Para esto el almidón debe ser sometido primero a una modificación (Otegbayo *et al.*, 2024).

Con la aplicación de las mediciones reológicas se puede determinar la viscosidad, tixotropía, viscoelasticidad, y propiedades estructurales de yogurt. Las propiedades estructurales del yogurt están relacionadas con la calidad, tipo de ingredientes, y el proceso de elaboración. Para determinar viscosidad aparente, límite elástico, y propiedades tixotrópicas, se utilizan experimentos rotacionales. Para el caso de propiedades viscoelásticas y estructurales se estiman con ensayos oscilatorios o de fluencia. Las mediciones viscoelásticas evalúan simultáneamente la respuesta de un material en su comportamiento sólido (módulo elástico, G') y líquido (módulo viscoso, G''), que por lo regular se determinan en dos regiones, región de cizallamiento oscilatorio de pequeña amplitud (SAOS), y región de cizallamiento oscilatorio de gran amplitud (LAOS) por sus siglas en inglés respectivamente. El yogurt es un gel con microestructura de la red proteína-grasa, primordialmente elástico en la región SAOS (Espinosa-Andrews *et al.*, 2024).

Diversos estudios han abordado la modificación del almidón mediante el uso de Anhídrido Octenil succínico (OSA). En este sentido se muestra la Tabla 1, en el trabajo de Wang *et al.*, (2021) se enfoca en los métodos de preparación y caracterización, mientras que Altuna *et al.*, (2018), presenta una revisión integral sobre su obtención y aplicaciones en alimentos, proporcionando estudios relevantes para la siguiente investigación.

Tabla 1 Antecedentes de investigación de almidones modificados con OSA.

No	Año	Tipo	Nombre de la Investigación	Cita
1	2021	Artículo	Avances de la investigación sobre la preparación y caracterización de almidón modificado con ácido octenil succínico.	(Wang <i>et al.</i> , 2021)
2	2018	Artículo	Síntesis y caracterización del anhídrido octenil succínico modificando almidones para aplicaciones alimentarias. Una revisión de la literatura reciente.	(Altuna <i>et al.</i> , 2018)

Diversos estudios han demostrado que el tipo y la modificación del almidón influyen de manera significativa en las propiedades del yogurt. Pérez et al. (2021) evaluaron almidón de ñame y reportaron cambios relevantes en las características fisicoquímicas, reológicas y sensoriales del producto. Por su parte, He et al. (2019) analizaron almidones resistentes y observaron mejoras en la estabilidad del sistema, la capacidad de retención de agua y el desempeño funcional. De manera complementaria, Cui et al. (2014) estudiaron almidón acetilado reticulado, evidenciando efectos directos sobre la microestructura, la firmeza y la sinéresis del yogurt cuajado. En conjunto, estas investigaciones confirman que tanto el origen botánico como el tipo de modificación del almidón son determinantes en la respuesta fisicoquímica, reológica y sensorial del yogurt. Bajo este marco, el almidón modificado con OSA se perfila como una alternativa tecnológica de interés debido a su capacidad emulsificante y su contribución a la estabilidad de sistemas lácteos fermentados.

Tabla 2 Antecedentes de investigación de la adición de almidones en yogurt.

No	Año	Tipo	Nombre de la Investigación	Cita
1	2021	Artículo	Efecto del almidón de ñame (<i>Dioscorea spp</i>) sobre las propiedades fisicoquímicas, reológicas y sensoriales del yogurt.	(Pérez <i>et al.</i> , 2021)
2	2019	Artículo	Efecto de 2 tipos de almidones resistentes sobre la calidad del yogur.	(He et al., 2019)
3	2014	Artículo	Efecto del contenido de almidón acetilado reticulado sobre la estructura y estabilidad de yogurt cuajado.	(Cui <i>et al.</i> , 2014)

3. Justificación.

Actualmente existe un aumento de las enfermedades no transmisibles como obesidad, diabetes, entre otras, que están relacionadas con los malos hábitos alimenticios. Por este motivo, se han buscado alternativas para ofrecer alimentos procesados que aporten un menor contenido energético. El yogurt es un alimento procesado y en su formulación a nivel industrial contiene estabilizantes que disminuyen la sinéresis y modifican su textura. Entre estos estabilizantes se encuentran los industriales, almidones de fuentes convencionales, que presentan un índice glucémico alto (>70%). Por tal motivo, este trabajo propone estabilizar yogurt natural mediante la utilización de almidones de *Dioscorea bulbifera* L., una fuente no convencional con más del 70% de almidón

resistente. En consecuencia, la presente investigación se justifica al pretender dar un valor agregado al cultivo subutilizado de *Dioscorea bulbifera* L. usando su almidón para formular un yogurt estable a la sinéresis con menor índice glucémico que un yogurt adicionado con un estabilizante industrial.

4. Hipótesis.

La modificación química del almidón nativo de *Dioscorea bulbifera* L., mediante esterificación con Anhídrido Octenil Succínico (OSA) incrementará su capacidad para adsorberse en la interfase agua-aceite y estabilizar emulsiones, lo que permitirá mejorar las propiedades fisicoquímicas, texturales y reológicas del yogurt. En consecuencia, el uso de almidón OSA de *Dioscorea bulbifera* L., reducirá la sinéresis, aumentará la estabilidad del sistema y favorecerá un mayor contenido de almidón resistente, contribuyendo a la obtención de un yogurt con potencial funcional y menor impacto glucémico.

5. Objetivos.

5.1 Objetivo general.

Evaluar el efecto de la adición de almidón proveniente de *Dioscorea bulbifera* L., nativo y químicamente modificado, en yogurt, mediante pruebas de textura, pruebas reológicas y ensayos *in vitro*, para la identificación de su influencia sobre las propiedades fisicoquímicas y el índice glucémico del yogurt natural.

5.2 Objetivos específicos.

- Obtener almidón nativo y químicamente modificado de *Dioscorea bulbifera* L., mediante la evaluación de sus propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales, para proponerlo como aditivo en un yogurt natural.
- Evaluar las propiedades texturales y reológicas de un yogurt natural, adicionado con almidón nativo y químicamente modificado de *Dioscorea bulbifera* L., para compararlo con un yogurt control.
- Determinar el índice glucémico *in vitro*, de un yogurt natural adicionado con almidón nativo y químicamente modificado de *Dioscorea bulbifera* L., para poder proponerlo como posible alternativa al uso de almidones convencionales y estabilizantes industriales.

6. Materiales y Métodos.

6.1. Material vegetal.

Los bulbillos de *Dioscorea bulbifera* L., se obtuvieron del municipio de Zapotitlán de Méndez, ubicado en la Sierra Norte del estado de Puebla. Sus coordenadas geográficas se encuentran entre los paralelos 19° 58' 10" y 20° 01' 36" de latitud Norte y los meridianos 97° 38' 36" y 97° 44' 24" de longitud Occidental. El municipio abarca 20.30 km² y se encuentra a una altitud promedio de 640 m.s.n.m, oscilando entre los 600 m.s.n.m. y los 1500 m.s.n.m (Salvador Martínez, 2018). Los bulbillos fueron recolectados siete meses posteriores a su aparición, transcurriendo su ciclo de producción, alcanzando su estado de madures optima, el cual se evidencia con el cambio de coloración del exocarpio de verde a gris con tonalidades cafés.

6.2. Identificación del material vegetal.

La identificación del material vegetal se llevó a cabo mediante código de barras de ADN nuclear (DNA barcoding). El ADN de *Dioscorea bulbifera* L., se extrajo del tejido de las hojas, se utilizó un protocolo modificado basado en el uso de bromuro de cetil trimetil amonio con la metodología descrita en el trabajo de Borges *et al.* (2009). Los cebadores para definir la secuencia de ADN para matK y rbcL fueron matK2F-R (5'-CGT ACT TTT ATG TTT ACA GGC TAA-3') se usó para amplificar matK junto con equisetum-F (5'-ATA CCC CAT TTT ATT CAT CC-3'; RBG Kew), y en el caso de rbdL se utilizó rbcLa-F (5'- ATG TCA CCA CAA ACA GAG ACT AAA GC-3'), y rbcLajf634-R (5'-GAA ACG GTC TCT CCA ACG CAT-3'). Se llevaron a cabo las reacciones de PCR en un volumen total de 25 µL, obteniéndose las siguientes concentraciones finales: buffer Taq 1x (tampón para PCR con a ADN polimerasa), 2 mM MgCl₂, 0.2 mM de cada dNTP (trifosfato de desoxinucleótido), 0.12 µM de cada cebador y 0.63 U de Taq DNA polimerasa recombinante. Las condiciones de PCR para matK fueron en 94 °C por un tiempo de 3 min, seguido de 35 ciclos a 94 °C por 30 s, 52 °C durante 30 s, 72 °C por 45 s; y para finalizar la extensión a 72°C por un tiempo de 10 min. En el caso de la PCR para rbcL se realizó a 94 °C por un tiempo de 2 min, seguido de 30 ciclos de 94 °C durante 1 min, 48 °C por 1 min, 72 °C durante 2.5 min; y un proceso final de extensión a 72 °C por un tiempo de 7 min. Los resultados de la aplicación por PCR se purificaron usando placas Centri-Sep (ThermoFisher Scientific). Las reacciones de secuenciación se llevaron a cabo en un volumen total de 10 µL el cual estaba compuesto de 3 µL de agua, 2 µL de tampón 5x, 1 µL de BigDye (ThermoFisher Scientific), 1 µL de cebador y 3 µL del producto de la PCR purificado. En

cuanto al ciclo térmico se incluyeron 30 ciclos de 96 °C por un tiempo de 10 s, 50°C durante 5 s, y 60 °C por 4 min. Los productos del ciclo de secuenciación se purificaron usando placas Centri-Sep y se corrieron en un analizador de DNA (ThermoFisher scientific, 3730xl, E.E. U.U.).

Las secuencias fueron ensambladas, editadas, y recortadas para eliminar los sitios cebadores usando Sequencher version 4.8 (Gene Codes, Inc., Ann Arbor, MI) y BioEdit versión 7.2.3. Se comprobaron las secuencias para poder determinar los codones de paro y las mutaciones de cambio de marco de lectura con Traslador X. La identidad genérica del espécimen fue confirmada consultando todas las secuencias en GenBank usando BLAST versión 2.2.26. Los aciertos con un valor e de 10-20 o menos fueron retenidos y analizados. Las secuencias fueron analizadas usando MAFFT versión 7 con el método iterativo de refinamiento FFT-NS-i. Las inserciones-deleciones (indels) en matK fueron codificadas usando “codificación indel simple” implementada en 2 matrix. Se obtuvieron árboles óptimos para las matrices resultantes usando TNT versión 1.5 y se verificó la ausencia de contaminante. La calidad de la secuencia, la complejidad lingüística, y la separación del código de barras fueron realizadas de acuerdo con Hernández-León *et al.*, (2018).

6.3. Obtención del almidón de *Dioscorea bulbifera* L.

El aislamiento de almidón proveniente de *Dioscorea bulbifera* L. se realizó empleando el método descrito por Hernández-Uribe *et al.*, (2020). Los bulbillos de *Dioscorea bulbifera* L. fueron lavados para eliminar impurezas y con ayuda de un pelador manual se retiró el exocarpo. Los bulbillos fueron cortados en trozos cúbicos de 1 a 2 cm por lado, 6 kg de los cuales se mezclaron con 3 L de una solución de ácido cítrico al 3% durante un tiempo de 5 min. La mezcla obtenida se molió en una licuadora industrial (INTERNATIONAL, LI-12A, México), y se filtró con la ayuda de una manta de cielo. El retenido de la filtración se molió en una licuadora convencional (Osterizer, MAX BLSTPBTG, E.E. U.U.) para posteriormente filtrarlo empleando manta de cielo. La muestra se tamizó utilizando un tamiz número 100 (150 µm de apertura de malla) y el filtrado se pasó por un tamiz número 325 (45 µm de apertura de malla). El filtrado se dejó en reposo durante 30 min, pasado el tiempo se realizó una separación del almidón sedimentado mediante la decantación del sobrenadante. Al almidón sedimentado se le realizaron un total de 3 lavados con agua destilada, los cuales constaron de la adición de 5L de agua destilada, agitación de la mezcla, tiempo de reposo de 4 horas y decantación del sobrenadante y de la capa superior de color amarillo-cremoso que se formó, y un lavado extra que constó de la adición de 5L de agua destilada, la mezcla se agitó, y se mantuvo en reposo durante 8 h; posteriormente se decantó el sobrenadante. Finalmente, el almidón

sedimentado se extrajo en charolas de aluminio, se secó en una estufa de secado convectivo (QL, 10GC, E.E. U.U.) a 45 °C durante 48 h.

El rendimiento de obtención del almidón fue calculado por medio de la Ecuación 1, y se expresó en porcentaje.

$$\eta = \frac{D}{M} * 100 \dots \text{Ecuación 1.}$$

Donde: D , es el peso del almidón seco; M , es el peso inicial de los cubos de bulbillos; y η , es el rendimiento de obtención del almidón expresado en porcentaje (Hernández-Uribe *et al.*, 2020).

6.4. Modificación del almidón de *Dioscorea bulbifera* L. con Anhídrido Octenil Succínico.

La modificación de los gránulos de almidón de *Dioscorea bulbifera* L. se realizó químicamente con Anhídrido Octenil Succínico (OSA) utilizando el método descrito por Estrada-Fernández *et al.*, (2020). Se tomaron 20 g de almidón seco y se disolvió en agua destilada (30% p/p) con agitación continua. Se diluyó OSA en alcohol isopropílico en proporción (1:3 v/v). El OSA diluido se mezcló con almidón en relaciones de 0.6, 1.2, 2.4 y 3% peso de OSA con respecto a la materia seca del almidón durante un periodo de 2, 4 y 6 h; los experimentos fueron realizados por duplicado. El pH se mantuvo constante a 8.5 con ayuda de NaOH 0.1 N, la reacción estuvo en constante monitoreo durante todo el tiempo establecido para mantener un pH constante de 8.5. Transcurrido el tiempo de reacción, se detuvo neutralizando con HCl 0.5 N a pH 6.5.

Para el aislamiento de las partículas de almidón, se añadió un total de 190 g de agua destilada a la suspensión de la reacción obtenida en el paso anterior y se centrifugó a 5000 g durante 7 min en una centrifuga (HERMLE, Z36HK, Alemania). El sobrenadante se decantó y el sedimento fue suspendido en 350 mL de agua destilada y centrifugado bajo las mismas condiciones, descartando el sobrenadante. El segundo sedimento se suspendió en 300 mL de acetona, se agitó durante 5 min con ayuda de un vórtex y se centrifugó nuevamente bajo las mismas condiciones, descartando el sobrenadante. El sedimento final se dejó en reposo a temperatura ambiente durante 24 h y posteriormente se secó en una estufa de secado convectivo (QL, 10GC, E.E. U.U.) a 45 °C durante 48 h. El almidón modificado (AM) se codificó como AM_{XZ}, donde el subíndice X indica la concentración de OSA y Z el tiempo de reacción. El almidón nativo se denominó como NS. (Estrada-Fernández *et al.*, 2020).

6.5. Determinación del grado de sustitución del almidón y eficiencia de reacción.

La determinación del grado de sustitución (GS) del almidón de *Dioscorea bulbifera* L., se realizó por titulación siguiendo el método descrito por Estrada-Fernández *et al.*, (2020). El GS es el número promedio de los grupos OH sustituidos por grupos OSA en cada molécula de glucosa. Se pesó 5g de almidón modificado con OSA en una balanza analítica (ADAM, PW124, México) y se dispersó con agitación magnética durante 30 min en 25 mL de una solución de HCl 2.5 N en alcohol isopropílico. A esta mezcla se le añadieron 100 mL de una solución de alcohol isopropílico 90 % (v/v), con agitación constante durante 10 minutos. La suspensión se filtró con ayuda de un papel filtro Whatman No. 1 (Whatman paper Filters, E.E. U.U.), el retenido se lavó 3 veces con 50 mL de alcohol isopropílico al 90 % (v/v). El retenido se recuperó dispersándolo en 300 mL de agua destilada, esta dispersión se colocó en un baño maría a temperatura de ebullición del agua durante 20 min. La solución resultante de almidón se sometió a una titulación con NaOH 0.1 N usando como indicador fenoltaleína. El GS se determinó mediante la Ecuación 2, y se expresó en porcentaje. La eficiencia de reacción se calculó mediante la Ecuación 3; de igual manera se expresó en porcentaje.

$$GS = \frac{(0.162 * \frac{A * M}{P})}{1 - (0.210 * (\frac{A * M}{P}))} * 100 \dots \text{Ecuación 2.}$$

Donde: *A*, es el NaOH gastado en la titulación; *M*, es la molaridad del NaOH; *P*, es el peso del almidón utilizado; y *GS*, es el grado de sustitución del almidón expresado en porcentaje.

$$ER = \frac{GS}{GST} * 100 \dots \text{Ecuación 3.}$$

Donde: *GS*, es el grado de sustitución del almidón; *GST*, es el grado de sustitución teórico; y *ER*, es la eficiencia de reacción expresado en porcentaje (Estrada-Fernández *et al.*, 2020).

6.7. Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR).

El análisis de los espectros de infrarrojo del almidón nativo (AN) y modificado con una concentración de 3.0% de OSA Y 6 h de reacción, el cual presentó el mayor grado de sustitución (AM_{3.0;6}), se consiguieron de un FR-IR (System Spectrum GX, PerkinElmer, E.E. U.U.). Se siguió el método descrito por Wang *et al.* (2021). Se registraron 256 espectros con una resolución de 4 cm⁻¹, abarcando el rango de número de onda de 4000-400 cm⁻¹, expresados en porcentaje de transmitancia.

6.8. Determinación del almidón resistente en *Dioscorea bulbifera* L.

La cuantificación del almidón resistente (AR) se siguió el método oficial AOAC 2002.02/ AACC 32-40.01 AOAC (2000) descrito por Shukri et al., (2015), este método es aplicable a muestras que contienen más del 2% p/p de almidón resistente (AR). Las muestras se prepararon con 50 g de almidón nativo (AN) y modificado (MS_{3,0;6}) de *Dioscorea bulbifera* L. y se tamizaron por un tamiz de número 18 con apertura de 1.0 mm. El almidón digerible o no resistente se solubiliza e hidroliza a D-glucosa por la interacción con dos enzimas, para esto, se pesó con precisión 100±5 mg de almidón en tubo con tapón de rosca (tubo de cultivo Corning, 16 x 125 mm), se le añadieron 4.0 mL de solución α -amilasa pancreática (10 mg/mL) que contiene 3 U/mL de amiloglucosidasa (AMG). Los tubos se taparon herméticamente y se colocaron en un mezclador vórtex (FISHER SCIENTIFIC, G-560, España), posteriormente se colocaron en un baño de agua con agitación. Los tubos se incubaron a 37 °C por 16 h con agitación continua (200 golpes/minuto). La reacción se detuvo añadiendo 4 mL de etanol (99% v/v) y se agitó en un vórtex. Posteriormente la muestra se centrifugó a 1,500 g durante 10 min en una centrifuga (LABOGENE, Modelo 1248R, Corea) y el AR se recuperó como sedimento. El sobrenadante se decantó cuidadosamente y se reservó, mientras que el sedimento se suspendió en 2 mL de etanol (50 % v/v) se mezcló con ayuda de un mezclador vórtex, se le añadió 6 mL de etanol al (50% v/v) seguido de una centrifugación de 1500 g por 10 min en una centrifuga (LABOGENE, Modelo 1248R, Corea), el sobrenadante se decantó cuidadosamente y se reservó, al sedimento se le repitió el paso de la suspensión hasta la centrifugación.

Para la medición del AR se introdujo una barra agitadora magnética (5 x 15 mm) y 2mL de KOH 2M en cada tubo para volver a suspender los gránulos de AR se mantuvo en agitación constante por 20 min en un baño de hielo/agua sobre una parrilla con agitación (PMC INDUSTRIAS, 502A, E.E.U.U.). A la solución se le añadió 8 mL de solución buffer de acetato de sodio 1.2 M (pH 3.8) y se mezcló con 0.1 mL de AMG (3,300 U/mL), seguido a esto se colocó la muestra con un baño de agua a 50°C. Los tubos se incubaron durante 30 min para hidrolizar el almidón a glucosa AMG, con mezcla intermitente en un mezclador vórtex. Se realizó una transferencia completa del contenido del tubo a un matraz aforado de 100 mL (utilizando una botella de lavado con agua) para extraer el imán. La solución se aforó con agua destilada a 100 mL, se centrifugó una alícuota de la solución a 1500 g durante 10 minutos en una centrifuga (LABOGENE, Modelo 1248R, Corea). Se pasaron alícuotas de 0.1 mL (por duplicado) de los sobrenadantes diluidos a tubos de ensayo de vidrio (16 x 100 mm) Se añadieron 3 mL de reactivo glucosa oxidasa/peroxidasa (GOPOD) a la muestra y se incubó (LAB LINE, Imperial, E.E.U.U.), a 50 °C durante 20 min. Posteriormente, el almidón no resistente (almidón solubilizado) se cuantificó reuniendo el sobrenadante original y se le realizaron lavados, ajustando el volumen total a 100 mL y midiendo la concentración de D-glucosa utilizando el reactivo (GOPOD). Para poder determinar el contenido de almidón se analizó la absorbancia de cada solución a 510 nm

frente al blanco de reactivo que se va a preparar mezclando 0.1 mL de tampón acetato sódico 100 mM (pH 4.5) y 3mL de reactivo GOPOD. El AR se determinó con la ecuación 4, expresado en porcentaje.

$$AR = \Delta A * \frac{F}{W} * 9.27 \dots \text{Ecuación 4.}$$

Donde: *AR*, es el contenido de almidón resistente expresado en porcentaje; ΔA , es la absorbancia leída contra el blanco; *F*, es la conversión de absorbancia a microgramos (100 (µg de D-glucosa) dividido por la absorbancia GOPOD); *W*, es el peso seco de la muestra analizada.

Medición del almidón no resistente (solubilizado), se combinaron las soluciones sobrenadantes obtenidas al centrifugar la incubación inicial, con los sobrenadantes obtenidos de los dos lavados con etanol al 50% v/v, la mezcla se aforó a 100 mL con tampón acetato sódico 100 mM (pH 4.5). Se incubaron alícuotas de 0.1 mL de esta solución (por duplicado) con 10 L de AMG diluida (300 U/mL) en una solución buffer de maleato sódico 100 mM (pH 6) 20 min a 50°C. Se le añadió 3 mL de reactivo GOPOD y se incubó a 50°C durante 20 min. Para finalizar se midió la absorbancia a 510 nm frente a un blanco de reactivo. Los cálculos de almidón no resistente y almidón total se determinaron con las ecuaciones 5 y 6 expresadas en porcentaje.

$$Non - AR = \Delta A * \frac{F}{W} * 90 \dots \text{Ecuación 5.}$$

Donde: *Non-AR*, es el almidón no resistente o almidón digerible; ΔA , es la absorbancia leída contra el blanco; *F*, es la conversión de absorbancia a microgramos (100 µg de D-glucosa dividido por la absorbancia GOPOD); *W*, es el peso seco de la muestra analizada.

$$AT = AR + Non - AR \dots \text{Ecuación 6.}$$

Donde: *AT*, es el contenido de almidón total; *AR*, es el contenido de almidón resistente; y *Non-AR*, es el contenido de almidón no resistente o almidón digerible.

6.9. Análisis químico proximal del almidón nativo y modificado de *Dioscorea bulbifera* L.

La humedad se determinó siguiendo el método 925.10 descrito por AOAC (2000). Se obtuvieron crisoles a peso constante en una estufa de secado convectivo (QL, 10GC, E.E.U.U.) a 105°C por 24 h. Los crisoles se enfriaron en un desecador durante 30 min y después se pesaron en una balanza analítica (ADAM, PW124, México). Se colocaron 3 g de almidón nativo y modificado con sus repeticiones. Se colocaron los crisoles con las muestras de almidón en una estufa de secado convectivo (QL, 10GC, E.E.U.U.) a 105 °C por 4 h. Se dejó enfriar los crisoles en un desecador

durante 30 min y posterior a eso se pesaron en una balanza analítica (ADAM, PW124, México). El porcentaje de humedad se calculó mediante la ecuación 7, se expresó en porcentaje.

$$\% \text{ Hu} = \frac{W_1 - W_2}{W} * 100 \dots \text{Ecuación 7.}$$

Donde: W_1 , es el peso del crisol junto con la muestra húmeda en gramos; W_2 , representa el peso del crisol con la muestra seca en gramos; W , indica el peso de la muestra en gramos; y Hu , es la humedad expresada en porcentaje.

Cenizas siguiendo el método 923.03 descrito por AOAC (2000).

Se tomaron los crisoles con la muestra seca obtenidos de la determinación de humedad. Se calcinaron en una mufla (Thermo SCIENTIFIC, BF51842C-1, Alemania) se mantuvo a 550 °C durante 4 horas. Posteriormente se dejó enfriar a temperatura ambiente y se pesaron en una balanza analítica (ADAM, PW124, México). La determinación del contenido de cenizas se realizó utilizando la ecuación 8, y se expresó en porcentaje.

$$\% \text{ Ce} = \frac{W_1 - W_2}{W} * 100 \dots \text{Ecuación 8.}$$

Donde: W_1 , representa el peso del crisol con la muestra calcinada en gramos; W_2 , es el peso constante del crisol en gramos; W , es el peso de la muestra en gramos; y Ce , es el contenido de cenizas expresado en porcentaje.

Lípidos siguiendo el método 920.85 descrito por AOAC (2000).

En la determinación del contenido de lípidos se utilizó el método Soxhlet. Se colocaron los matraces del equipo Soxhlet hasta peso constante en una estufa de secado convectivo (QL, 10GC, E.E.U.U.) a 105 °C por 12 horas. Se enfriaron los matraces en un desecador y se pesaron en una balanza analítica (ADAM, PW124, México). Se colocaron 3 g de muestra en cartuchos de celulosa, en un extractor de grasa (BUCHI, E-812/816 SOX, Suiza). Se utilizó éter de petróleo como disolvente en la ebullición, el proceso fue de 6 ciclos en un tiempo de 3.45 h. El cálculo se determinó por diferencia de peso en los matraces con la ecuación 9, expresado en porcentaje.

$$\% \text{ Li} = \frac{W_1 - W_2}{W} * 100 \dots \text{Ecuación 9.}$$

Donde: W_1 , es el peso del matraz con grasa expresada en gramos; W_2 , representa el peso constante del matraz en gramos; W , indica el peso de la muestra en gramos; y Li , es el contenido de lípidos expresado en porcentaje.

Proteína siguiendo el método 920.87 descrito por AOAC (2000).

Para determinar el porcentaje de proteínas se realizó con el método Kjeldahl, dividido en un proceso de digestión, destilación y titulación. En el proceso de digestión se colocó en matraz Kjeldahl .5 g de muestra en papel libre de nitrógeno con 5 g de una mezcla digestora, y 15 mL de ácido sulfúrico concentrado. Se colocaron los matraces en el Digestor Kjeldahl, junto con un extractor de humos por 4 h. Se retiraron los matraces del digestor y se dejaron enfriar para proceder con la destilación. Se colocó el matraz con 15 mL de agua destilada en el destilador (BUCHI, Kjel Master K325, Suiza) y un matraz Erlenmeyer con 50 mL de ácido bórico diluido con dos gotas de rojo de metilo y destilar. La titulación se realizó con ácido sulfúrico 0.1N. El porcentaje total de nitrógeno (% Ni) se calculó con la ecuación 10.

$$\% \text{ Ni} = \frac{(V)(N)(\text{meqN})}{W} * 100 \dots \text{Ecuación 10.}$$

Donde: V , son los mL gastados de H_2SO_4 ; N , es la normalidad del H_2SO_4 ; W , indica el peso de la muestra expresado en gramos; y Ni , es el porcentaje de nitrógeno.

El porcentaje de proteína se calculó con la ecuación 11, expresado en porcentaje.

$$\% \text{ Pro} = (Ni) (Fc) \dots \text{Ecuación 11.}$$

Donde: Ni , es el porcentaje de nitrógeno; Fc , es el factor de conversión equivalente a 6.25 expresado en porcentaje; Pro, es el contenido de proteína expresado en porcentaje.

Carbohidratos siguiendo el método descrito por AOAC (2000).

Los carbohidratos se determinaron con la diferencia de los análisis químicos anteriores y 100, representado en la ecuación 12, expresado en porcentaje.

$$\% \text{ Carbohidratos} = 100 - (\text{Humedad} + \text{Cenizas} + \text{Lípidos} + \text{Fibra} + \text{Proteínas}) \dots \text{Ecuación 12.}$$

6.10. Capacidad de retención de agua CRA e Índice de solubilidad en agua ISA.

La CRA e ISA se relacionaron con la capacidad que tiene los gránulos de almidón de absorber agua y la exudación de fracciones de almidón. Se siguió el método descrito por Bryant y Hamaker (1997) con ligeras modificaciones. Se realizó una dispersión 1% p/p de almidón en 20 mL de agua destilada, la dispersión se homogenizó con ayuda de un vórtex (FISHER SCIENTIFIC, G-560, España). Se realizaron 7 tratamientos uno a T ambiente y los siguientes que van de 40 a 90 °C con un

intervalo de 10° C entre tratamiento con ayuda de un baño maría (PolyScienc, WD05DG1B, E.E.U.U.). Se agitaron cada 5 minutos durante 15 minutos en un vórtex (FISHER SCIENTIFIC, G-560, España). Posteriormente se centrifugó a 2300 rpm durante 15 minutos en una centrifuga (LABOGENE, Modelo 1248R, Corea). Los tubos se decantaron, posteriormente se pesó el sobrenadante, y de igual manera el sedimento en una balanza analítica (ADAM, PW124, México). Los pesos fueron utilizados para calcular la CRA expresado en $\text{g g}^{-1}_{\text{muestra}}$ e ISA expresado en porcentaje.

$$\text{CRA} = \frac{Pg - Pm}{Pm} \dots \text{Ecuación 13.}$$

Donde: Pg , es el peso del gel en gramos; Pm , es el peso de la muestra expresado en gramos; y CRA , es la capacidad de retención de agua expresado en $\text{g g}^{-1}_{\text{muestra}}$.

$$\% \text{ ISA} = \frac{Ps}{Pm} \dots \text{Ecuación 14.}$$

Donde: Ps , es el peso del sobrenadante en gramos; Pm , es el peso de la muestra en gramos; y ISA es índice de solubilidad en agua expresado en gramos.

6.11. Formulación de las muestras de yogurt.

La elaboración del yogurt se realizó de acuerdo con la metodología de Pérez *et al.* (2021). Se obtuvo leche entera, homogeneizada y pasteurizada (Grupo Lala, S.A.B De C.V., México). La elaboración de las formulaciones se dividió en 8 tratamientos un control positivo (CP) a sinéresis sin agregarle ningún estabilizante, un control negativo (CN) al cual se le agregó un estabilizante comercial (Palsgaard PM 0111, Palsgaard Industri de México, S. de R.L. de C.V.) en una concentración del 1%, los tratamientos restantes fueron adicionados con concentraciones de 0.8, 1.0 y 1.2% tanto de almidón nativo y modificado, y fueron codificados como Y_{XZ} , donde el subíndice X representa el tipo de almidón (AN o AM) y el subíndice Z la concentración. Para el caso del (CP) se realizó un tratamiento térmico a 85°C durante 10 min y se dejó enfriar las muestras hasta alcanzar una temperatura de 43°C. Se le adicionó bacterias termófilas en el cual se sembró la leche con cultivo iniciador (YO-MIX® 401 LYO 50 DCU, International Flavors & Fragrances Inc. Países Bajos) conteniendo *Streptococcus salivarius* spp. Thermophilus y *Lactobacillus delbruekii* spp. Bulgaricus. La muestra se incubó a 43°C durante 4 h en una incubadora (LAB LINE, Imperial, E.E. U.U.), por último, se dejó enfriar a 8°C para su conservación y análisis. Para el caso de CN se realizaron dos tratamientos térmicos uno a 60°C donde se le adicionó el estabilizante (Palsgaard PM 0111) en una concentración del 1%, posteriormente se incrementó la temperatura a 85°C durante 10 minutos, en

todo este proceso se mantuvo en agitación constante, posteriormente se realizó una disminución de temperatura hasta alcanzar 43°C. Se le adicionó bacterias termófilas en el cual se sembró la leche con cultivo estándar (YO-MIX® 401 LYO 50 DCU, International Flavors & Fragrances Inc. Países Bajos) conteniendo *Streptococcus salivarius* spp. *Thermophilus* y *Lactobacillus delbruekii* spp. *Bulgaricus*. La muestra se incubó a 43°C durante 4 horas en una incubadora (LAB LINE, Imperial, E.E. U.U.). Por último, se dejó enfriar a 8°C para su conservación y análisis. Para el caso de los tratamientos Y_{AN0.8}, Y_{AN1.0}, Y_{AN1.2}, Y_{AM0.8}, Y_{AM1.0}, Y_{AM1.2}, se siguió el mismo procedimiento con que se realizó el NC, con la variación en la concentración y el tipo de estabilizante (AN, AM) utilizado.

6.12. Análisis de pH.

En la medición de pH se usó un potenciómetro digital (Thermo SCIENTIFIC, ORION STAR A111, Indonesia). Se realizó el análisis a los 8 tratamientos (CP, CN, Y_{AN0.8}, Y_{AN1.0}, Y_{AN1.2}, Y_{AM0.8}, Y_{AM1.0}, Y_{AM1.2}). Se calibró el potenciómetro con ayuda del buffer 7, 4 y 10. Se introdujo el electrodo en la muestra de yogurt y se leyó el pH, las lecturas se realizaron 3 veces a cada tratamiento, se lavó el electrodo con agua destilada entre cada lectura.

6.13. Acidez titulable.

La acidez titulable se determinó siguiendo el método 942.15 descrito en la AOAC (2000). Se realizó el análisis a los 8 tratamientos (CP, CN, Y_{AN0.8}, Y_{AN1.0}, Y_{AN1.2}, Y_{AM0.8}, Y_{AM1.0}, Y_{AM1.2}) por triplicado. Se realizó por medio de una titulación con una solución valorada de NaOH 0.1 N. Se transfirieron 9 mL de yogurt de cada tratamiento en un vaso de precipitado y se le agregaron 3 gotas de una solución de fenolftaleína al 3%. A continuación, se procedió a titular la muestra hasta que se observó una coloración rosa persistente durante un minuto. La acidez titulable se calculó y expresó como porcentaje de ácido láctico. Teniendo en cuenta que por cada mL de NaOH gastado equivale a 10 grados Dornic (°D). El porcentaje de ácido láctico se calculó con la ecuación 15.

$$\% LAC = \frac{^{\circ}D \cdot 0.1}{10} \dots \text{Ecuación 15.}$$

Donde: *LAC*, es el porcentaje de ácido láctico, °D, son los grados Dornic.

6.14. Sinéresis.

Con el fin de evaluar la sinéresis de las formulaciones de yogurt se siguió la técnica de Dircio-Morales *et al.* (2023). Se realizó el análisis a los 8 tratamientos (CP, CN, Y_{AN0.8}, Y_{AN1.0}, Y_{AN1.2}, Y_{AM0.8},

$Y_{AM1.0}$, $Y_{AM1.2}$). Se midió 10 g de yogurt de cada muestra (por triplicado). Se usó una centrífuga (HERMLE, Z36HK, Alemania) a 398 g durante 10 min. El suero se separó de la muestra, se decantó el sobrenadante (suero) y se pesó en una balanza analítica (ADAM, PW124, México). El porcentaje de sinéresis se calculó con la Ecuación 16, la masa se expresó en gramos.

$$S = \frac{Ms}{Mm} * 100 \dots \text{Ecuación 16}$$

Donde: S , es el porcentaje de sinéresis, Ms , es la masa del suero separado de la muestra, y Mm , es la masa de yogurt introducida a la centrífuga.

Propiedades fisicoquímicas.

Todas las propiedades fisicoquímicas fueron determinadas en los días 0, 7, 14, y 21 de almacenamiento bajo condiciones de refrigeración (4°C).

6.15. Medición de textura.

Para determinar los parámetros de textura (firmeza, consistencia, cohesividad y trabajo de cohesión), se siguió el método descrito por Cárdenas et al., (2013) utilizando un texturómetro (Stable Micro Systems, TA.XT, E.E.U.U.). Se realizó el análisis a los 8 tratamientos (CP, CN, $Y_{AN0.8}$, $Y_{AN1.0}$, $Y_{AN1.2}$, $Y_{AM0.8}$, $Y_{AM1.0}$, $Y_{AM1.2}$). Se realizaron 12 repeticiones por tratamiento en los días 0, 7, 14, 21. Se realizó la medición de la fuerza de doble compresión en las muestras (150 mL) se utilizó un cuerpo cilíndrico de 7.3 cm de diámetro y descendiendo a velocidad de 30mm/s.

6.16. Análisis reológico.

Para las mediciones reológicas se usó un reómetro de esfuerzo controlado (TA Instruments; Newcastle, AR1000, E.E.U.U.), equipado con un sistema Peltier para controlar la temperatura a 4°C, siguiendo el método descrito por Espinosa-Andrews et al., (2024) utilizado una geometría plato-plato con un diámetro de 40 mm y una distancia entre platos de 1000 μm . El análisis se les realizó a los 8 tratamientos (CP, CN, $Y_{AN0.8}$, $Y_{AN1.0}$, $Y_{AN1.2}$, $Y_{AM0.8}$, $Y_{AM1.0}$, $Y_{AM1.2}$). Se realizaron mediciones de flujo en cuatro ciclos, divididos en dos ciclos ascendentes y dos ciclos descendentes con un rango de 0.03 a 300 s^{-1} a 10°C. Para caracterizar el comportamiento del flujo, se aplicó el modelo de Oswalt-de Waele (ley de la potencia). Se efectuaron barridos de amplitud de deformación en el intervalo de 0.01 a 1 %, a una frecuencia constante de 1 Hz a 10°C, con el fin de determinar la región viscoelástica lineal (RVL). Los barridos de frecuencia se realizaron en un intervalo de 0.05 a 5 Hz con una amplitud

de deformación constante de 0.07%, evaluando parámetros como el módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'').

6.17. Viscosidad aparente.

La viscosidad aparente de las muestras de yogurt se midió siguiendo lo descrito por Dircio-Morales *et al.* (2023). El análisis se les realizó a los 8 tratamientos (PC, CN, $Y_{AN0.8}$, $Y_{AN1.0}$, $Y_{AN1.2}$, $Y_{AM0.8}$, $Y_{AM1.0}$, $Y_{AM1.2}$) por triplicado, la muestra se midió con un viscosímetro (Brookfield, Modelo DVII, E.E.U.U.), con un husillo número 4. Se obtuvieron curvas de flujo a 1, 2, 5, 10, 20 y 50 rad/s (Dircio-Morales *et al.*, 2023).

6.18. Modelo *in vitro* de estimación del índice glucémico en muestras de yogurt.

La función principal del modelo *in vitro* es reproducir las respuestas que ocurren en el sistema gastrointestinal que va desde la boca, estómago e intestino delgado en un ambiente controlado. Para realizar el estudio *in vitro* se siguió el método de García-Gamboa *et al.* (2019) con modificaciones, dividido en tres fases; 1) fase de digestión oral, 2) fase de digestión gástrica y 3) fase de digestión intestinal. Se tomó como referencia la porción diaria de yogurt de 200 g el cual es equivalente a lo establecido por el Sistema Mexicano de Alimentos Equivalentes (SMAE). Considerando que el consumo del yogurt en ayuno, se utilizaron 20 g en una relación 1:10, se añadió la enzima α -amilasa a una temperatura de 37° C por 5 minutos con un pH de 6.9, para la fase de digestión oral. Para la fase de digestión gástrica se realizó en un tiempo de 2 h, se ajustó el pH a 2-2.5, la temperatura a 37 ° C y 120 rpm en una parrilla con agitación (THERMO CIMAREC, SP131325, E.E.U.U.), se agregaron 330 mg de pepsina y se tomaron muestras del minuto 0, 60 y 120 de la digestión. En la fase de digestión intestinal se mantuvo la temperatura a 37°C y 120 rpm en una parrilla con agitación THERMO CIMAREC, SP131325, E.E.U.U.), se cambió el pH a 5-5.5 durante 4 hrs, se le agregó 190 mg de pancreatina, 1 g de oxgal (sales biliares) y 10 mg de lipasa, se tomaron muestras a la mitad y al final de la digestión.

6.19. Determinación de glucosa, fructosa y sacarosa por método de HPLC.

Se determinaron los carbohidratos simples libres, susceptibles de ser absorbidos. Determinando la concentración de glucosa, fructosa y sacarosa por el método de HPLC. Las muestras recabadas en la digestión de estómago e intestino delgado se centrifugaron a 7000 rpm durante 15 min. El sobrenadante se recuperó con una jeringa de 3 mL y se filtró con filtros de 0.2 micrómetros,

el filtrado se colocó en viales de 1.1 mL para el análisis en HPLC. Se obtuvo agua Milli-Q (Milli-Q, IQ 7000, Germany) y se le realizó un doble filtrado con filtros 0.2 micrómetros, así como también una fase móvil de acetonitrilo:agua en proporción 75:25, las muestras se analizaron en un HPLC (Waters ACQUITY Arc System, E.E. U.U.) con una columna H-87.

6.20. Análisis estadístico.

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza de una vía (ANOVA), con una comparación de medias de Tukey, o t student dependiendo del número de medias a comparar, y se consideraron diferencias significativas a $P \leq 0.05$.

7. Resultados y Discusión.

7.1. Rendimiento de almidón de bulbillos de *Dioscorea bulbifera* L.

Se presenta un rendimiento de 13.17 % de almidón de *Dioscorea bulbifera* L., considerando el porcentaje de almidón en base seca, respecto a la pulpa de bulbillos de *Dioscorea bulbifera* L. en base seca. El aislamiento de almidón se realizó utilizando 32.652 kg de bulbillos de *Dioscorea bulbifera* L. en grado de madurez óptima, después de la eliminación del exocarpio en el bulbillo se obtuvo 27.806 kg de pulpa comestible, se extrajeron 1.087 kg de almidón en su forma seca, cifra que se utilizó para determinar el porcentaje de eficiencia del proceso. Para Hernández-Urbe *et al.* (2020) el contenido de almidón extraído es bajo, por lo que indican que el proceso de aislamiento de almidón tiene como resultado una extracción de almidón de alta pureza. En otro trabajo realizado por (Araujo de Vizcarrondo *et al.*, 2004) el porcentaje de rendimiento es de 28.48 g/100 g en base seca, siendo mayor al rendimiento obtenido en el presente trabajo, esto se le puede atribuir a el método de extracción utilizado. En cambio, fue mayor a lo obtenido por (Meaño Correa *et al.*, 2014) el cual muestra un rendimiento de 7.71 %. Estos cambios en el porcentaje de rendimiento se pueden atribuir a los distintos métodos empleados para la obtención del almidón de *Dioscorea bulbifera* L.

7.2. Modificación química de almidón nativo de *Dioscorea bulbifera* L.

En la figura 2 se muestra el grado de sustitución que se produjo por la modificación de almidón nativo de *Dioscorea bulbifera* L. Se obtuvo una eficiencia de reacción de 81.69 %. El grafico muestra la evaluación del grado de sustitución (GS) en función al tiempo de reacción, se pudo apreciar un aumento progresivo del GS conforme aumenta el tiempo de 2 a 6 horas, y respecto a la

concentración de OSA que va en aumento de 0.6 a 3.0 %. Por lo que el mejor tratamiento es AM_{3.0}, el cual tiene la mayor concentración y el mayor tiempo de reacción. De manera general y respecto con los resultados obtenidos, se encontró que a mayor concentración de OSA y con mayor tiempo el grado de sustitución GS se incrementó, esto se debe que a mayor concentración la disponibilidad de OSA incrementa, por lo que el grado de sustitución también Abiddin et al., (2018). Atribuyen que la modificación con OSA tiene lugar en la parte amorfa del almidón, considerando a la modificación con OSA una reacción heterogénea. Bhosale & Singhal, (2006) mencionan que debido a la reducción de la disposición de los grupos hidroxilo en el almidón se disminuye la sustitución con OSA. Por lo tanto, la esterificación depende de la concentración del OSA. Los grupos hidrofílicos y lipofílicos presentes en el almidón esterificado con OSA permiten reducir la tensión superficial y estabilizar las emulsiones en comparación con el almidón nativo. El almidón OSA es incoloro e inodoro, las propiedades emulsionantes dependen del GS, un GS alto aumenta la interacción electrostática (Wang *et al.*, 2021).

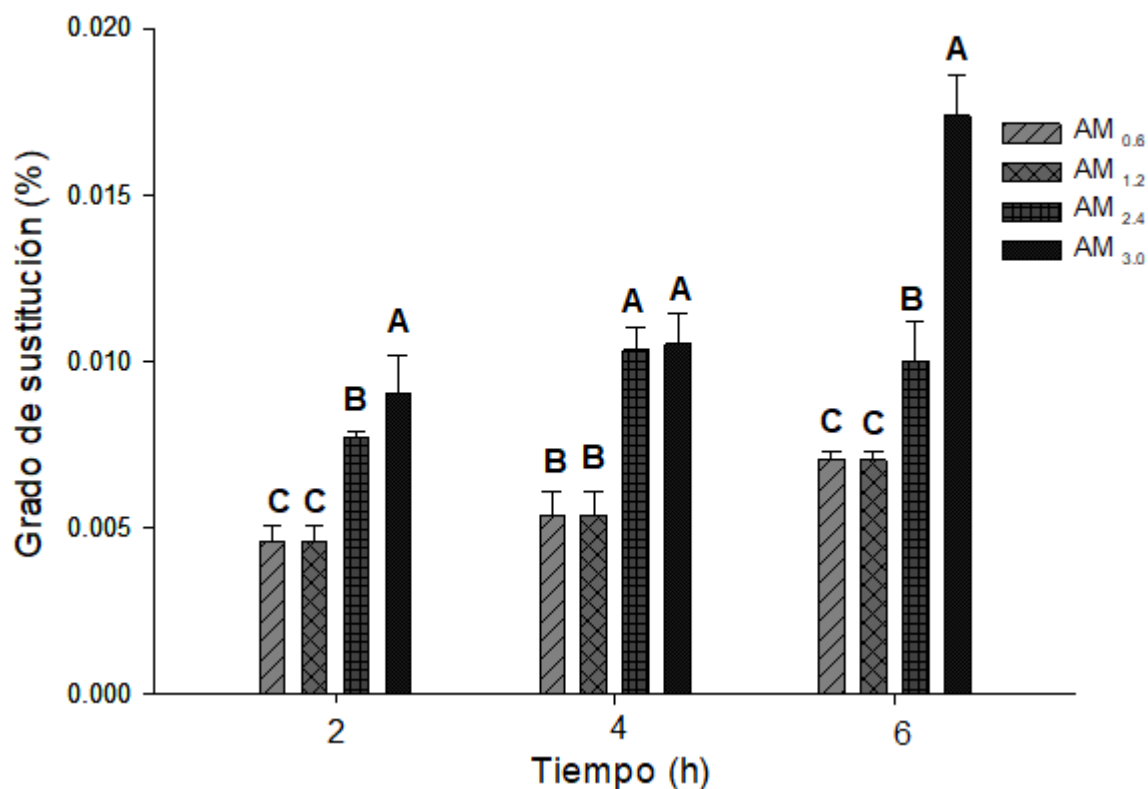


Figura 2 Gráfica del grado de sustitución. Promedio de tres repeticiones $\pm$ desviación estándar. Letras diferentes en cada barra indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos a cada tiempo ($P \leq 0.05$) por Tukey.

7.3 Espectros de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR).

Con ayuda del FT-IR se lograron reconocer las alteraciones en la estructura del almidón después de la modificación con OSA. En la figura 3 se muestra los espectros de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR) de almidón nativo y modificado de *Dioscorea bulbifera* L. (AM_{3,0;6}), cabe destacar que solo se realizó a esta concentración con OSA, porque presentó mayor grado de sustitución, por lo que las otras concentraciones en los distintos tiempos se descartaron. Donde se puede apreciar las bandas de vibración características de los almidones de 3100 y 3600 cm^{-1} . Ya que todos los almidones presentan perfiles similares en los números de onda que van de 3350 a 3000 cm^{-1} perteneciente a los grupos O-H. El cambio en el número de onda 2929 y 2927 cm^{-1} se asocia al estiramiento del C-H, asociados a cambios en la retrogradación del almidón. En 1646 cm^{-1} se observó la vibración de flexión de absorción de agua. En la región que abarca de 800-1200 cm^{-1}

también conocida como huella digital, se identifican cambios atribuibles al estiramiento C-O (Estrada-Fernandez *et al.*, 2020). Los números de onda 1148, 1076 y 991/998 cm^{-1} muestran estiramientos asimétricos del grupo CH_2 , del carbonilo C-O y la presencia de zonas amorfas, respectivamente, por lo tanto, indica una mezcla de regiones cristalinas y amorfas que determinan las propiedades del almidón (Fawale *et al.*, 2025). El número de onda alrededor de 1020 cm^{-1} se le atribuye al estiramiento de C-O del enlace C-O-C, y la deformación de H-H a las deformaciones de C-H y CH_2 . En el caso del almidón modificado con OSA se observaron dos cambios más en los números de onda, 1731 y 1535 cm^{-1} correspondientes a la vibración de estiramiento asimétrico del grupo carboxilato (RCOO^-). Estos resultados comprueban que los grupos OH en el almidón son remplazados por grupos éster carbonilo y carboxilo de la OSA (Bello-Pérez *et al.*, 2005). El primero corresponde a la vibración $\text{C}=\text{O}$, indicando la formación de grupos éster carbonílicos (Bharti *et al.*, 2019; Estrada-Fernández *et al.*, 2020), mientras que el segundo se relaciona con la vibración asimétrica del grupo carboxilato (RCOO^-) (Hui *et al.*, 2009; Estrada-Fernández *et al.*, 2020). La intensidad en el intervalo de número de onda está relacionada con el grado de sustitución GS. Dado que el grado de sustitución presentado por AM3.0;6 fue bajo (0.017 ± 0.001 %), por lo que el cambio es poco perceptible, siendo los espectros de los demás tratamientos imperceptibles (datos no presentados). Altuna *et al.* (2018) menciona que el grado de sustitución teórico del almidón usando una concentración de 3% OSA es del 0.0213 %, lo cual es cercano al valor obtenido en este trabajo. Estos resultados demuestran la inserción del grupo OSA en la estructura del almidón, mediante la sustitución de algunos de sus grupos hidroxilo.

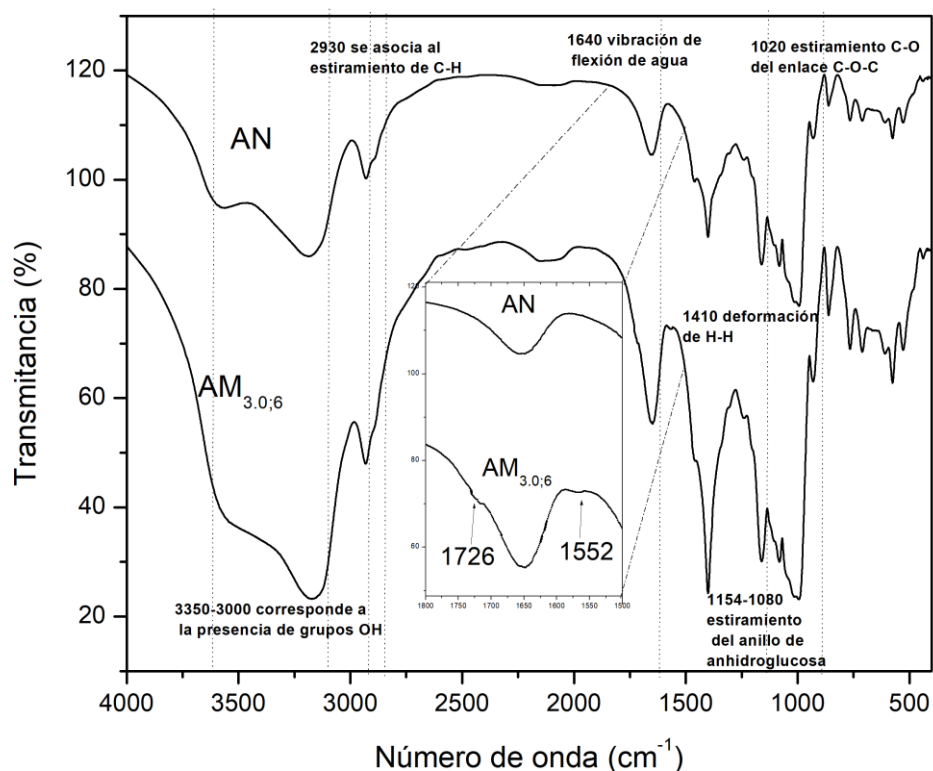


Figura 3 Espectros de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR) de almidón nativo AN y modificado AM de *Dioscorea bulbifera* L. con 3% de OSA por 6 horas (AM3.0;6). Se muestra un zoom para observar los cambios presentes en la modificación en los números de onda 1726 y 1552 cm^{-1}

7.4. Determinación de almidón resistente (AR) en almidón nativo y modificado de *Dioscorea bulbifera* L.

En el cuadro 5 se puede observar el porcentaje de almidón resistente el cual es considerado una fibra dietética, los resultados obtenidos para el almidón resistente no presentaron diferencias estadísticamente significativas a lo reportado para *D. bulbifera* L. ($73.14 \pm 1.17\%$) por (Hernández-Uribe *et al.*, 2020), para el caso del almidón modificado no presenta diferencias estadísticamente significativas, pero hay una disminución de 2.87 g/100 g puede ser atribuido a la modificación del almidón. Estos resultados son consistentes con los valores reportados por Fawale *et al.* (2024), quienes observaron $71.60 \pm 0.80\%$ para la misma especie y $64.20 \pm 0.50\%$ para *D. alata*.

Tabla 3 Porcentaje de almidón resistente en almidón nativo y químicamente modificado de *Dioscorea bulbifera* L.

Contenido de almidón resistente %

Muestra	Almidón resistente (g/100g)
Almidón nativo	72.14 ± 0.92 ^a
AM _{3,0;6}	69.27 ± 0.08 ^a

Promedio de tres repeticiones ± desviación estándar. Resultados presentados en base seca. Letras diferentes en cada columna indican diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) por t. student.

7.5. Análisis químico proximal de almidón nativo y modificado de *Dioscorea bulbifera* L.

En la tabla 4 se presenta la estructura química del almidón en su forma nativa y modificada por esterificación de *Dioscorea bulbifera* L., los porcentajes de proteína, lípidos, cenizas y el contenido de carbohidratos, para el caso de la determinación de fibra se deduce que la fibra presente en el almidón se le considera fibra dietética o almidón resistente. Respecto a los resultados obtenidos del almidón nativo en el caso de humedad, cenizas son estadísticamente diferentes respecto a lo establecido por (Hernández-Urbe *et al.*, 2020). Por otra parte, se puede apreciar que el contenido de lípidos y proteína cambia en el caso de almidón esterificado respecto al almidón nativo, el aumento de 0.089 % de lípidos en el almidón esterificado respecto al almidón nativo, se debe a la combinación de los grupos hidrofóbicos del compuesto OSA que esta interactuando. En el caso del cambio en el porcentaje de proteína, el cual redujo 0.1743 % del almidón nativo respecto al almidón modificado, derivado que el almidón no es completamente puro, y que este está interactuando con proteína del material vegetal de origen, se le puede atribuir este cambio a la interacción de la solución alcalina NaOH al 0.1N con el almidón nativo, interfiere con los enlaces almidón-proteína, por lo que el porcentaje de proteínas reduce. Las proteínas son las encargadas de conferir al almidón su aroma distintivo y su capacidad para formar espuma en la mayoría de los tipos de almidón (Guízar Miranda *et al.*, 2008). El contenido de lípidos es bajo para el caso de almidón nativo 0.6657 ± 0.1149 , aumenta para almidón modificado con un contenido de 0.7547 ± 0.0762 , esto se debe a la incorporación de los grupos OSA en la modificación. Los lípidos presentes en el almidón dañan las características funcionales del almidón tales como la capacidad de humectación, solubilidad y claridad, ya que evitan la unión con las moléculas de agua y causan rancidez durante el almacenamiento (Mirandaa *et al.*, 2008).

Tabla 4 Análisis químico proximal de almidón de nativo y químicamente modificado de *Dioscorea bulbifera* L.

Caracterización de almidón de *Dioscorea bulbifera* L. (% b.s.)

Análisis químico proximal	Almidón nativo	Almidón modificado con OSA (AM _{3.0;6})
Humedad	8.9723 ± 0. 2232 ^a	11.2066 ± 1. 9869 ^a
Cenizas	0.4998 ± 0. 1001 ^a	0.4961 ± 0.0992 ^a
Lípidos	0.6657 ± 0. 1149 ^a	0.7547 ± 0.0762 ^a
Proteína	0.3483 ± 0.0022 ^a	0.1740 ± 0.0002 ^b
Carbohidratos	92.8193 ± 0. 5558 ^a	87.3683 ± 1. 8280 ^b

Promedio de tres repeticiones ± desviación estándar. Letras diferentes en cada fila indican diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) por t de Student.

7.6. Capacidad de retención de agua CRA.

En la figura 4 se presenta la capacidad de retención de agua en el almidón, es una propiedad funcional dependiente en su mayoría del contenido de amilopectina, en donde la amilosa actúa como un agente diluyente e inhibidor del hinchamiento. En la figura 4 se muestra los cambios de CRA en almidón nativo y modificado de *Dioscorea bulbifera* L. Para el caso de ambos almidones se observó un incremento en los valores de CRA aumentando de manera ascendente respecto a la temperatura, ambos mostraron mayor capacidad de retención de agua a 70°C, donde un estudio realizado por Hernández-Uribe *et al.* (2020) muestran que a 70°C es la temperatura de gelatinización del almidón aislado de *Dioscorea bulbifera* L. Existe diferencia estadísticamente importante entre ambos almidones por lo que se puede apreciar que en todos los tratamientos a diferentes temperaturas existe esta diferencia. Por lo que el almidón químicamente modificado tiene mayor capacidad de retención de agua que el almidón nativo. Cuando el almidón se gelatiniza los gránulos de este se expanden cambiando las propiedades cristalinas internas. Se ha descubierto que el grupo OSA introducido por la modificación del almidón, dificulta las interacciones de las moléculas internas del almidón mejorando la hidrofobicidad en comparación con el almidón nativo, por lo que el almidón OSA es

más susceptible a la gelatinización. Dentro de las ventajas del almidón OSA una de ellas es que se pueden elaborar productos con diferentes viscosidades dependiendo del producto, siendo adecuados para la utilización como espesante (Wang *et al.*, 2021). Por lo que el incremento de capacidad de retención de agua se considera que la incorporación de los grupos OSA, provoca la ruptura de las interacciones intramoleculares en la amilosa, lo que produce un desdoblamiento de las regiones con dobles hélices y genera una alteración en la organización del gránulo de almidón (Estrada-Sierra *et al.*, 2024).

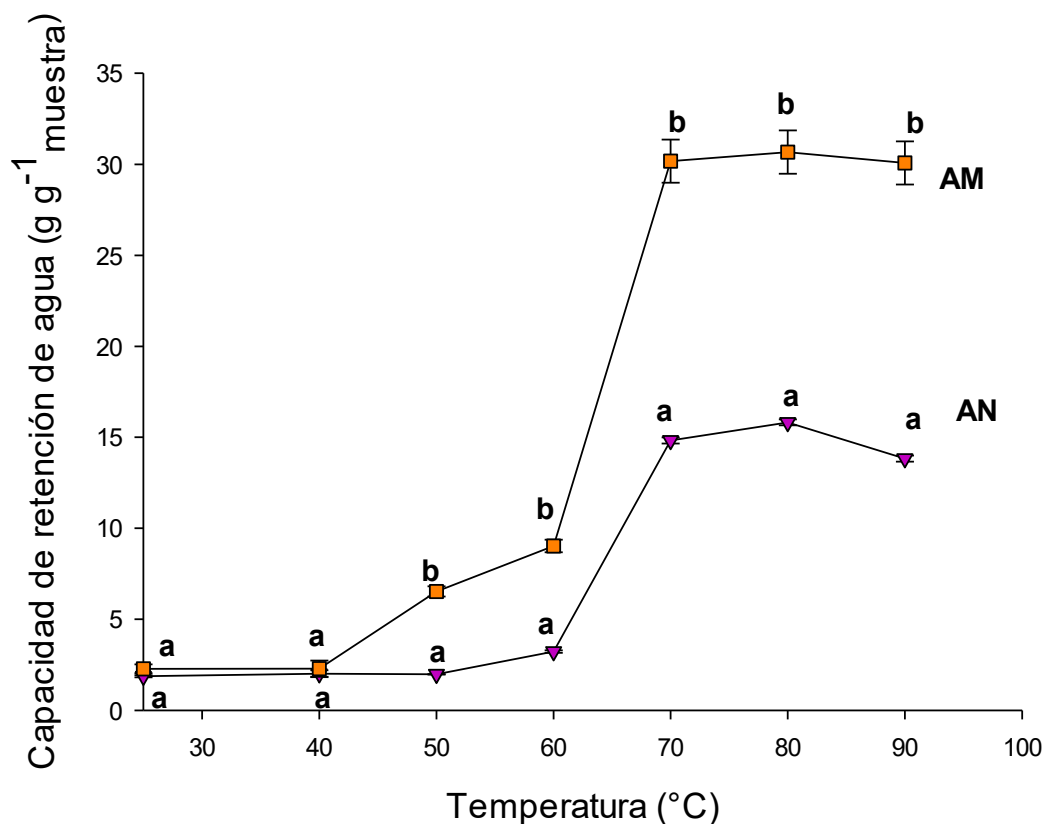


Figura 4 Gráfica de CRA, donde AM es el almidón modificado y AN almidón nativo. Letras diferentes entre tratamientos a la misma temperatura indican diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$) por *t* student.

7.7. Índice de solubilidad del almidón de *Dioscorea bulbifera* L. en agua (ISA).

En la figura 5 se muestra el índice de solubilidad en agua, el cual nos indica la capacidad que tiene el almidón de reaccionar con agua y disolverse en ella, el grado de asociación existente, siendo la parte amorfa del almidón a quien se le atribuye la capacidad de solubilizarse en agua. En la figura

5 se muestra los porcentajes de índice de solubilidad de agua de almidón nativo y químicamente modificado de *Dioscorea bulbifera* L., donde los valores de ISA incrementan después de los 70°C esto debido a que es la temperatura de gelatinización del almidón, por lo que los puentes de hidrogeno intramoleculares de la amilosa se rompen provocando el hinchamiento de los gránulos de almidón (Bao *et al.*, 2022). Los almidones esterificados con OSA tienen mejor estabilidad con respecto a los almidones nativos. Esto se da gracias a la hidrofobicidad del almidón OSA lo que hará que absorba agua y se hinche, ya que la estructura espacial será una configuración coloidal uniforme aumentando la transparencia (Wang *et al.*, 2021).

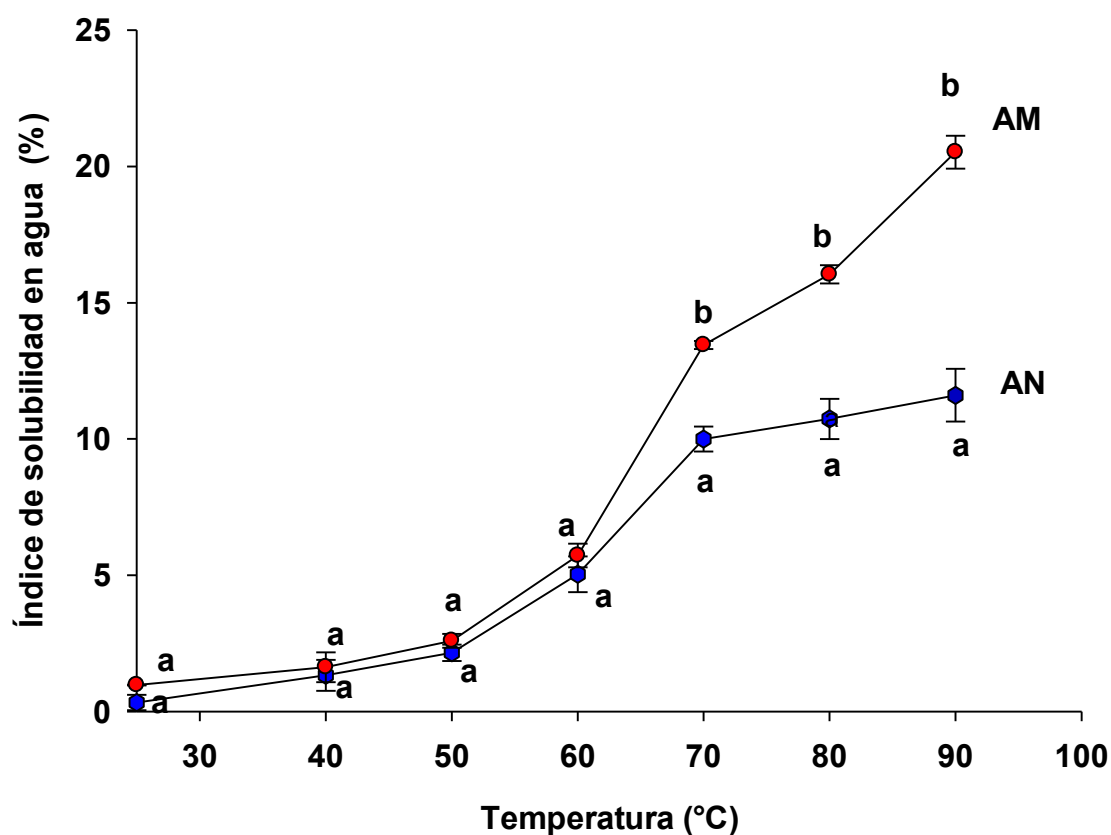


Figura 5 Gráfica de ISA, donde AM es el almidón modificado y AN almidón nativo. Letras diferentes entre tratamientos a la misma temperatura indican diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$) por *t* student.

7.8. Análisis de pH en formulaciones de yogurt.

En la figura 6 se muestra las mediciones de pH en las formulaciones de yogurt, los datos se recabaron los días 0, 7, 14 y 21 para medir si presentaron cambios, ya que el pH ayuda a mantener la estructura del gel proteico. El pH con el que cuenta un yogurt natural oscila de 4.0-4.5, el yogurt sin estabilizante presentó un pH de 4.57, mientras que, para el caso de los yogures estabilizados, con el estabilizante comercial y el almidón nativo en una concentración de 0.8%, obtuvieron mediciones de pH mayores, caso contrario a los yogurts estabilizados con 1 y 1.2% de almidón nativo, y los yogurts estabilizados con almidón modificado en todas sus concentraciones. Todos los tratamientos presentaron una disminución de pH del día 0 al día 21. El tratamiento CN tuvo el pH más alto al inicio (4.71 ± 0.07) y el tratamiento $Y_{AN0.8}$ (4.83 ± 0.04), siendo el tratamiento con los valores más estables durante el almacenamiento. El tratamiento CP mostró una disminución del pH respecto al tiempo, alcanzando el valor más bajo (4.15 ± 0.12) al día 21. $Y_{AN1.0}$ mostró el menor cambio en los valores de pH durante los 21 días. En el día 0, hay diferencias significativas entre tratamientos, siendo $Y_{AN0.8}$ el de pH más alto (4.83 ± 0.04) y $Y_{AN1.0}$ el más bajo (4.32 ± 0.01). A partir del día 7, las diferencias entre tratamientos se reducen, pero se siguen observando ligeras variaciones. Para el día 21, todos los tratamientos se estabilizan en un rango de pH entre 4.15 ± 0.12 (CP) y 4.29 ± 0.07 ($Y_{AN1.0}$), lo que indica una acidificación moderada. El pH es un parámetro clave para controlar el proceso de fermentación del yogurt, ya que permite evaluar la actividad del cultivo iniciador y su capacidad para transformar la lactosa en ácido láctico. Los cambios en los valores de pH antes y después del enfriamiento reflejan dicha actividad microbiana. Según Fitch-Vargas *et al.* (2025), el pH del yogurt debe situarse entre 3.3 y 4.5, rango en el cual se encuentran los resultados obtenidos en este estudio Figura 6. De manera similar, Pérez *et al.* (2021) observaron valores de pH de 4.4 - 4.5 en yogures elaborados con almidón de *Dioscorea rotundata* y *D. alata* al día 1, los cuales disminuyeron a 4.2 - 4.3 durante el almacenamiento. Esta reducción fue atribuida a la acción de los microorganismos, que metabolizan carbohidratos residuales generando ácido láctico, así como pequeñas cantidades de CO₂ y ácido fórmico. Esto se debe al incremento de la biomasa de las bacterias ácido láctico en el yogurt respecto al tiempo de almacenamiento. En el proceso de elaboración de yogurt se utilizan estabilizantes con el fin de mejorar, textura, consistencia, y firmeza en el gel. Si bien la incorporación de estos estabilizantes no afecta directamente los parámetros fisicoquímicos como lo es el pH, si tiene interferencia en el proceso de fermentación, por lo cual puede aumentar o disminuir (Boulares *et al.*, 2025).

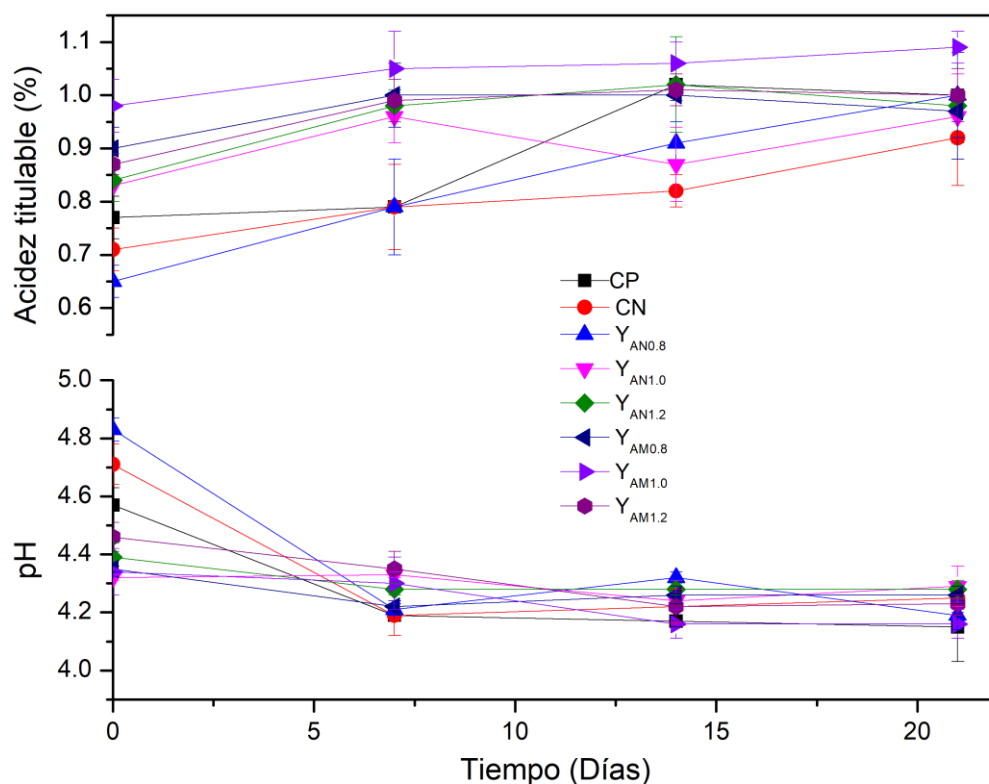


Figura 6 Efecto de la utilización de estabilizantes sobre la acidez titulable (%) y el pH del yogurt durante el almacenamiento.

7.9. Acidez titulable.

En la Figura 6 se puede observar la concentración de ácido láctico expresado en porcentaje, en la mayoría de los tratamientos los valores incrementan del día 0 al día 14 y, posteriormente, se estabilizan o descienden lentamente al día 21. La producción del ácido láctico en la fermentación de la lactosa es la principal función de las bacterias iniciadoras. Al día 0, el tratamiento $Y_{AM1.0}$ registró la mayor acidez (0.98 ± 0.05 %), mientras que $Y_{AN0.8}$ presentó la más baja (0.65 ± 0.03 %). Se presentó un incremento el día 14. Todos los tratamientos superaron sus valores iniciales, con un rango de 0.82 a 1.06 %. $Y_{AM1.0}$ se mantuvo entre los más elevados. Al día 21, la acidez se estabilizó o disminuyó ligeramente, aunque $Y_{AM1.0}$ alcanzó nuevamente el valor más alto (1.09 ± 0.03 %), lo que sugiere una actividad microbiana prolongada. $Y_{AM1.0}$ y $Y_{AM0.8}$ mantuvieron niveles por encima de 1% durante todo el periodo. Las diferencias entre tratamientos y tiempos resultaron estadísticamente significativas en

numerosos casos, aspecto crucial para evaluar la calidad y la estabilidad del yogur durante el almacenamiento. En el almacenamiento, el ácido producido en aumento podría afectar negativamente la calidad del yogurt, a esto se le denomina efecto de postacidificación. Existen aditivos prebióticos que afectan la producción de ácido cambiando la actividad enzimática con la hidratación, y en ocasiones cambian el metabolismo de la bacterias ácido lácticas (He *et al.*, 2019).

7.10. Sinéresis en formulaciones de yogurt.

La Figura 7 presenta los valores del porcentaje de sinéresis. En todos los casos se observaron patrones similares: el cual incremento en la sinéresis a partir del día 14, posteriormente disminuyó. Este cambio fue más notorio en los tratamientos control (CP y CN) en comparación con los yogures formulados con almidón nativo y modificado de *Dioscorea bulbifera* L. La reducción del porcentaje de sinéresis se atribuyó al fortalecimiento o al aumento del número de enlaces entre las partículas del gel, por lo que se sugiere una mayor hinchazón y cohesión estructural en una superficie más amplia (Pérez *et al.*, 2021). El control positivo (CP) presentó alta sinéresis al día 7 (20.58%), que disminuyó al día 14 (9.71%) y aumentó moderadamente al día 21 (14.36%), evidenciando comportamiento inestable. El control negativo (CN) no presentó sinéresis, indicando estabilidad total del gel. En tratamientos con almidón nativo, $Y_{AN0.8}$ mostró un aumento abrupto de 7.54% a 20.55% (día 7), luego disminuyó a 10.81% y cerró en 14.33%, similar al CP. $Y_{AN1.0}$ tuvo valores bajos y estables (7.85 y 12.13%), mientras que $Y_{AN1.2}$ se mantuvo entre 11.05% y 12.91%, con menor variabilidad. En los tratamientos con almidón modificado, $Y_{AM0.8}$ y $Y_{AM1.2}$ mostraron sinéresis similares ($\approx 11\%$), pero $Y_{AM0.8}$ fue más estable. $Y_{AM1.0}$ inició bajo (7.31%) y aumentó gradualmente hasta 14.09%, con buena estabilidad. $Y_{AM1.2}$ partió de 9.15% y alcanzó 13.82%, con variaciones mínimas. Por lo tanto, $Y_{AN0.8}$ presentó la mayor sinéresis, especialmente al día 7, reflejando un efecto negativo del almidón nativo en baja concentración. Los yogures con almidón modificado, en especial $Y_{AM1.0}$ y $Y_{AM1.2}$, mostraron menor sinéresis y mayor estabilidad, destacando por su mejor retención de suero. Diversos estudios señalan que los almidones actúan como miméticos de grasa, reteniendo agua en redes débiles y, por tanto, reduciendo la sinéresis. Los almidones modificados desarrollaron una malla más compleja con la caseína, gracias a la gelatinización y a interacciones proteína-almidón, lo que reforzó la retención de agua y la firmeza del yogurt (Fitch-Vargas *et al.*, 2025). Cuando la red de caseína se ve sometida a tensión mecánica, la aglomeración excesiva de almidón puede promover la expulsión de suero y aumentar la sinéresis (Pérez *et al.*, 2021). Estos autores reportaron sinéresis del 56–58.4 % en yogures con almidón de *Dioscorea rotundata* y *D. alata*, inferiores a la de un control con pectina (65 %), lo que respalda el efecto positivo, aunque dependiente de la concentración y del tipo de almidón. Los

resultados obtenidos confirman que el almidón de *D. bulbifera* L. modificada confirma que el almidón tiene un mayor control sobre el desuerado del yogur durante el almacenamiento.

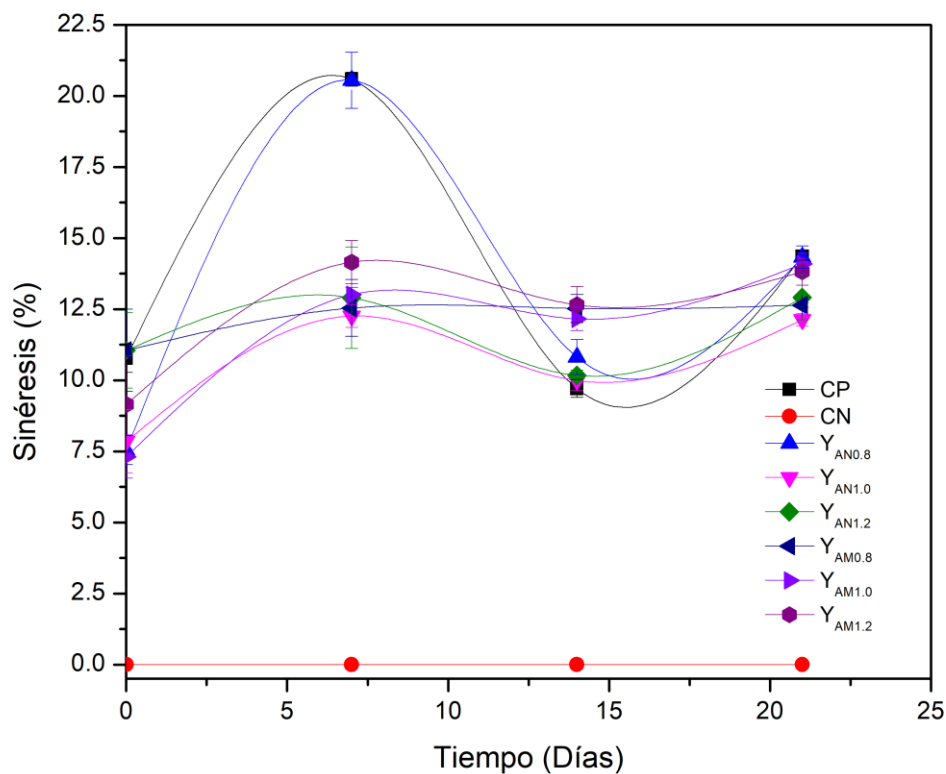


Figura 7 Efecto del tipo de estabilizante sobre sinéresis del yogurt durante el almacenamiento.

7.11. Parámetros de textura en la formulación de yogurt.

En la tabla 8 se presenta los parámetros de textura como son firmeza, consistencia, cohesividad, y trabajo de cohesión, de las muestras de yogurt. Se encontró que los yogures con estabilizante comercial tienen mayor firmeza y consistencia, así como mejor consistencia y trabajo de cohesión, y los tratamientos que presentaron las características con mayor similitud a esto, fueron los que se estabilizaron.

Se presentan los resultados de textura del yogur evaluados durante 21 días, considerando firmeza, consistencia, cohesividad y trabajo de cohesión en distintos tratamientos. En cuanto a la firmeza, el tratamiento CN mostró los valores más altos inicialmente (121.09 ± 8.14 g), pero

disminuyó progresivamente hasta $(94.28 \pm 8.17 \text{ g})$ al día 21. El CP se mantuvo estable, aunque con una leve reducción (de 51.18 ± 2.08 a $34.75 \pm 1.91 \text{ g}$). Los tratamientos con almidón (nativo y modificado) presentaron valores intermedios. En particular, $Y_{AM1.0}$ y $Y_{AM1.2}$ conservaron firmeza superior a 50 g hasta el día 14 (no se muestran los datos), mientras que $Y_{AN0.8}$ tuvo una tendencia similar al CP. $Y_{AM0.8}$ también destaca por mantener buena firmeza. You *et al.* (2024) reportan un aumento en la firmeza de yogures desnatados suplementados con almidón resistente. Este efecto se atribuye a que el almidón resistente puede interactuar con las proteínas circundantes, formando una red estructural compleja y estable. Como resultado, se incrementa la capacidad de unión entre las macromoléculas de caseína y se reduce la capacidad de gelificación del sistema. Respecto a la consistencia, CN presentó el valor más alto desde el inicio ($2706.02 \pm 243.75 \text{ g}\cdot\text{s}$), aunque inestable con el tiempo. Los tratamientos con almidón mostraron consistencias intermedias y mayor estabilidad, destacando $Y_{AM0.8}$ y $Y_{AM1.0}$. En contraste, el CP tuvo la menor consistencia. En general, los yogures con almidón modificado mantuvieron o incrementaron su consistencia hasta el día 14 (no se muestran datos), con leves disminuciones posteriores. En la cohesividad, el CN mostró los valores más negativos, lo que indica una estructura débil. Los tratamientos con almidón y el CP reflejaron mayor cohesión, especialmente $Y_{AM0.8}$ y $Y_{AM1.0}$. $Y_{AM1.2}$ fue el más estable al final del periodo. Menores valores negativos sugieren una textura más firme y menos quebradiza. En cuanto al trabajo de cohesión, todos los tratamientos mostraron una tendencia decreciente, pero más pronunciada en CN. $Y_{AM1.0}$ y $Y_{AM1.2}$ destacaron por requerir mayor energía de deformación, lo cual se relaciona con una textura más cremosa y resistente. Los almidones modificados, particularmente $Y_{AM1.0}$ y $Y_{AM1.2}$, contribuyeron a mejorar y conservar la textura del yogur durante el almacenamiento, mostrando mejor firmeza, consistencia y cohesión en comparación con los controles. El tratamiento CN presentó la textura más débil en todos los parámetros evaluados. Se observó que las propiedades texturales, incluyendo la firmeza, la cual es la resistencia a fuerzas externas, la consistencia (estado de la conexión interna), la cohesión (integridad estructural interna del gel) y el trabajo de cohesión (resistencia a la atracción en la superficie de contacto), presentaron una tendencia a la variación lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Liu *et al.* (2024), indicando que estos cambios podrían estar relacionados con los cambios en las propiedades gelificantes de las muestras de yogur, reportado que los almidones contribuyen a la formación del sistema gelificante del yogur, y por lo tanto mejora las propiedades texturales. Negi *et al.* (2024), realizaron yogures fermentados con *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii* spp *bulgaricus*, presentaron mejores propiedades de textura al incorporar almidón modificado. La firmeza y la cohesión disminuyen, lo que resultó en una textura más suave, atribuida a la gelatinización de los almidones, lo cual coincide con los resultados obtenidos.

Tabla 5 Análisis de parámetros de textura en formulaciones de yogurt.

Parámetros de textura en la formulación del gel en el yogurt.				
Tratamiento	Firmeza (g F)	Consistencia (c P)	Cohesividad	Trabajo de Cohesión (g F* s)
CP	244.99± 18.25 ^d	5973.54 ± 610.92 ^d	-273.16 ± 19.98 ^a	-143.05 ± 15.86 ^{ab}
CN	487.17 ± 10.73 ^a	11898.56 ± 442.20 ^a	-527.09 ± 41.83 ^d	-235.18 ± 72.65 ^c
AN 0.8%	238.89 ± 6.92 ^d	5937.09 ± 180.20 ^d	-314.10 ± 25.63 ^{ab}	-117.66 ± 25.01 ^a
AN 1.0%	241.55 ± 25.10 ^d	5760.30 ± 499.11 ^d	-319.03 ± 10.87 ^{ab}	-160.02 ± 32.77 ^{abc}
AN 1.2%	224.57 ± 19.65 ^d	5673.06 ± 454.48 ^d	-353.87 ± 25.61 ^b	-135.00 ± 2.97 ^{ab}
AM 0.8%	310.72 ± 14.20 ^c	8057.76 ± 256.45 ^{bc}	-428.57 ± 31.40 ^c	-178.84 ± 34.35 ^{abc}
AM 1.0%	361.10 ± 3.99 ^b	8722.74 ± 289.62 ^b	-592.61 ± 28.78 ^c	-217.82 ± 75.93 ^{bc}
AM 1.2%	307.60 ± 24.40 ^c	7346.95 ± 284.40 ^c	-535.35 ± 22.44 ^d	-204.30 ± 26.97 ^{abc}

Promedio de seis repeticiones ± desviación estándar. Letras diferentes en cada fila indican diferencias estadísticamente significativas respecto a los tratamientos ($P \leq 0.05$) por Tukey.

Tabla 6 Análisis de parámetros de textura en formulaciones de yogurt batido día 0.

Parámetros de textura en formulaciones de yogurt batido día 0.				
Tratamiento	Firmeza (g F)	Consistencia (c P)	Cohesividad	Trabajo de Cohesión (g F* s)

CP	51.18 ± 2.08 ^{cd}	1258.48 ± 31.02 ^{bc}	-49.87 ± 2.43 ^a	-27.02 ± 2.94 ^a
CN	121.09 ± 8.14 ^a	2706.82 ± 243.75 ^a	-207.16 ± 37.47 ^b	-125.44 ± 15.02 ^c
AN 0.8%	45.76 ± 4.71 ^d	1238.24 ± 136.87 ^{bc}	-50.92 ± 5.31 ^a	-51.49 ± 14.03 ^b
AN 1.0%	51.53 ± 3.12 ^{cd}	1287.53 ± 81.20 ^{bc}	-49.54 ± 6.30 ^a	-113.10 ± 28.66 ^c
AN 1.2%	48.71 ± 2.34 ^{cd}	1231.45 ± 45.46 ^{bc}	-51.63 ± 3.05 ^a	-35.45 ± 7.05 ^{ab}
AM 0.8%	55.80 ± 7.33 ^{bc}	1321.67 ± 107.60 ^{bc}	-53.65 ± 3.64 ^a	-37.77 ± 5.36 ^{ab}
AM 1.0%	62.28 ± 2.81 ^b	1382.40 ± 39.40 ^b	-63.98 ± 3.40 ^a	-26.23 ± 3.93 ^a
AM 1.2%	48.71 ± 4.94 ^{cd}	1165.47 ± 58.71 ^c	-43.84 ± 5.52 ^a	-48.29 ± 9.18 ^b

Promedio de ocho repeticiones ± desviación estándar. Letras diferentes en cada fila indican diferencias estadísticamente significativas respecto a los tratamientos ($P \leq 0.05$) por Tukey.

Tabla 7 Análisis de parámetros de textura en formulaciones de yogurt día 7.

Parámetros de textura en formulaciones de yogurt batido día 7.				
Tratamiento	Firmeza (g F)	Consistencia (c P)	Cohesividad	Trabajo de Cohesión (g F* s)
CP	47.56 ± 3.27 ^d	1284.60 ± 77.54 ^{bc}	-50.63 ± 3.04 ^{ab}	-138.28 ± 10.10 ^c
CN	115.54 ± 5.01 ^a	2684.16 ± 151.93 ^a	-162.07 ± 30.41 ^c	-168.24 ± 30.16 ^d
AN 0.8%	47.49 ± 5.07 ^d	1403.80 ± 98.44 ^b	-60.99 ± 5.60 ^b	-48.13 ± 5.00 ^{ab}

AN 1.0%	47.52 ± 2.61 ^d	1226.37 ± 71.67 ^c	-56.76 ± 5.11 ^b	-57.35 ± 8.96 ^b
AN 1.2%	49.13 ± 3.06 ^{cd}	1297.11 ± 87.56 ^{bc}	-56.02 ± 5.22 ^b	-42.94 ± 12.52 ^{ab}
AM 0.8%	54.19 ± 1.87 ^c	1347.45 ± 43.03 ^{bc}	-56.44 ± 3.12 ^b	-43.10 ± 7.41 ^{ab}
AM 1.0%	61.76 ± 3.82 ^b	1404.65 ± 82.45 ^b	-67.89 ± 5.85 ^b	-29.33 ± 3.05 ^a
AM 1.2%	53.97 ± 6.71 ^{cd}	1319.64 ± 126.42 ^{bc}	-35.56 ± 7.35 ^b	-33.52 ± 4.78 ^a

Promedio de ocho repeticiones ± desviación estándar. Letras diferentes en cada fila indican diferencias estadísticamente significativas respecto a los tratamientos ($P \leq 0.05$) por Tukey.

Tabla 8 Análisis de parámetros de textura en formulaciones de yogurt día 14.

Parámetros de textura en formulaciones de yogurt batido día 14.

Tratamiento	Firmeza (g F)	Consistencia (c P)	Cohesividad	Trabajo de Cohesión (g F* s)
CP	47.59 ± 3.98 ^c	1215.64 ± 70.60 ^c	-45.44 ± 19.98 ^a	-132.39 ± 30.73 ^d
CN	114.48 ± 10.31 ^a	2267.15 ± 174.56 ^a	-145.07 ± 40.43 ^b	-48.97 ± 14.34 ^{bc}
AN 0.8%	53.65 ± 1.12 ^c	1246.17 ± 29.90 ^c	-55.73 ± 3.90 ^a	-52.14 ± 7.05 ^{bc}
AN 1.0%	54.55 ± 5.14 ^c	1320.36 ± 79.46 ^c	-57.95 ± 5.14 ^a	-60.02 ± 7.01 ^c
AN 1.2%	51.12 ± 2.11 ^c	1274.92 ± 57.68 ^c	-49.48 ± 1.72 ^a	-36.56 ± 8.57 ^{ab}
AM 0.8%	53.42 ± 3.93 ^c	1312.98 ± 99.73 ^b	-48.81 ± 2.70 ^a	-47.83 ± 11.92 ^{bc}

AM 1.0%	64.14 ± 3.71 ^b	1489.37 ± 66.22 ^c	-65.03 ± 2.24 ^a	-38.26 ± 6.10 ^{abc}
AM 1.2%	49.22 ± 5.86 ^c	1249.00 ± 101.60 ^c	-50.80 ± 4.57 ^a	-24.87 ± 5.57 ^a

Promedio de ocho repeticiones ± desviación estándar. Letras diferentes en cada fila indican diferencias estadísticamente significativas respecto a los tratamientos ($P \leq 0.05$) por Tukey.

Tabla 9 Análisis de parámetros de textura en formulaciones de yogurt día 21.

Parámetros de textura en formulaciones de yogurt batido día 21.

Tratamiento	Firmeza (g F)	Consistencia (c P)	Cohesividad	Trabajo de Cohesión (g F* s)
CP	34.76 ± 1.91 ^d	931.11 ± 48.28 ^d	-34.50 ± 1.84 ^a	-98.40 ± 7.14 ^c
CN	94.28 ± 8.17 ^a	2143.16 ± 185.89 ^a	-100.34 ± 7.57 ^f	-38.17 ± 12.88 ^b
AN 0.8%	44.32 ± 1.50 ^c	1185.47 ± 52.28 ^{bc}	-55.64 ± 4.75 ^{cd}	-141.62 ± 8.51 ^e
AN 1.0%	53.17 ± 1.62 ^b	1220.91 ± 28.62 ^b	-56.02 ± 3.48 ^{cde}	-129.09 ± 7.32 ^d
AN 1.2%	41.50 ± 3.59 ^c	1056.63 ± 72.76 ^{cd}	-41.27 ± 3.46 ^{ab}	-25.31 ± 4.48 ^a
AM 0.8%	53.07 ± 3.55 ^b	1275.77 ± 82.40 ^b	-64.14 ± 8.13 ^e	-45.65 ± 7.22 ^b
AM 1.0%	52.75 ± 3.26 ^b	1298.53 ± 61.56 ^b	-63.75 ± 4.85 ^{de}	-23.76 ± 3.84 ^a
AM 1.2%	44.48 ± 2.29 ^c	1254.99 ± 89.15 ^b	-48.01 ± 4.00 ^{bc}	-42.60 ± 4.38 ^b

Promedio de ocho repeticiones ± desviación estándar. Letras diferentes en cada fila indican diferencias estadísticamente significativas respecto a los tratamientos ($P \leq 0.05$) por Tukey.

7.12. Análisis reológico.

En la Figura 4, se presentan los gráficos con el comportamiento viscoelástico de los tratamientos de yogur en función de la frecuencia angular, evaluando dos parámetros reológicos fundamentales G' (módulo de almacenamiento), el cual representa el comportamiento elástico de la red y la resistencia de la estructura que contribuye a la red 3D; y G'' (módulo de pérdida), representa el comportamiento viscoso de una muestra y caracteriza las interacciones que no contribuyen a la red 3D (Levy *et al.*, 2021). En la Figura 4a, se observa que en todos los tratamientos se presenta un incremento de G' con la frecuencia, CN presentó un comportamiento más elástico (sólido), en comparación con los demás tratamientos. El CP presenta un carácter elástico intermedio, más alto en comparación con algunos tratamientos con almidón ($Y_{AN0.8}$, $Y_{AN1.0}$, $Y_{AN1.2}$, $Y_{AM0.8}$ y $Y_{AM1.2}$) pero menor a $Y_{AM1.0}$. En la figura 4b, el módulo de pérdida G'' también incrementa con la frecuencia en todas las muestras, pero con valores considerablemente menores a G' . El CN mostró los valores más altos de G'' , indicando una mayor capacidad de disipar energía (mayor viscosidad). En los demás tratamientos ocurre el mismo comportamiento que para G' .

El tratamiento CN presentó los valores más altos de G' y G'' , lo que indica una estructura gelificada más desarrollada y un comportamiento predominantemente sólido, características de materiales con mayor rigidez estructural. Por otro lado, el tratamiento CP presentó valores intermedios en ambos módulos, lo cual sugiere un comportamiento elástico moderado, siendo menor que para CN. Finalmente, los tratamientos $Y_{AN0.8}$, $Y_{AN1.0}$, $Y_{AN1.2}$, $Y_{AM0.8}$ y $Y_{AM1.2}$, mostraron los niveles más bajos de G' y G'' , lo que refleja una estructura viscoelástica más débil, teniendo una menor capacidad de mantener una red estructural bajo esfuerzo, lo que se traduce en un comportamiento menos firme y más fluido. Todos los tratamientos mostraron que $G' > G''$ en todo el intervalo de frecuencia indicando un comportamiento predominantemente elástico, tipo gel, sugiriendo que la viscoelasticidad del gel mejoró gracias a la adición de AN y AM (Liu *et al.*, 2024). Por lo tanto, como G' es mayor a G'' , las propiedades sólidas predominan sobre las líquidas, este comportamiento es similar a lo reportado por Levy *et al.* (2021), que G' fue mayor que G'' en todos los rangos de frecuencia probados para sus muestras de yogures, lo cual indicó que la contribución elástica fue mayor que la viscosa. De acuerdo con Pang *et al.* (2019), la adición de almidón induce a un gel de yogur más fuerte a medida que la concentración de este aumenta. Al absorber agua de la fase continua se ha descrito que la adición de almidón también puede aumentar la concentración local de proteínas y mejorar las interacciones proteicas, aumentando así las características elásticas del gel (Morell *et al.*, 2015). Li *et al.* (2024), indica que la presencia de almidones puede generar interacciones fuertes

con las proteínas y mejorar la estructura de la red, formando una red proteica densa y las partículas de almidón agregas, mejorando la estructura de la red, provocando un comportamiento de flujo más elástico que viscoso. Lobato-Calleros, *et al.*, (2014), encontraron que la adición de almidones a yogures bajos en grasa contribuye a la formación de sistemas gelificados de leche acidificada dispersos más estables y que puede inducir gran efecto en la microestructura de los sistemas lácteos.

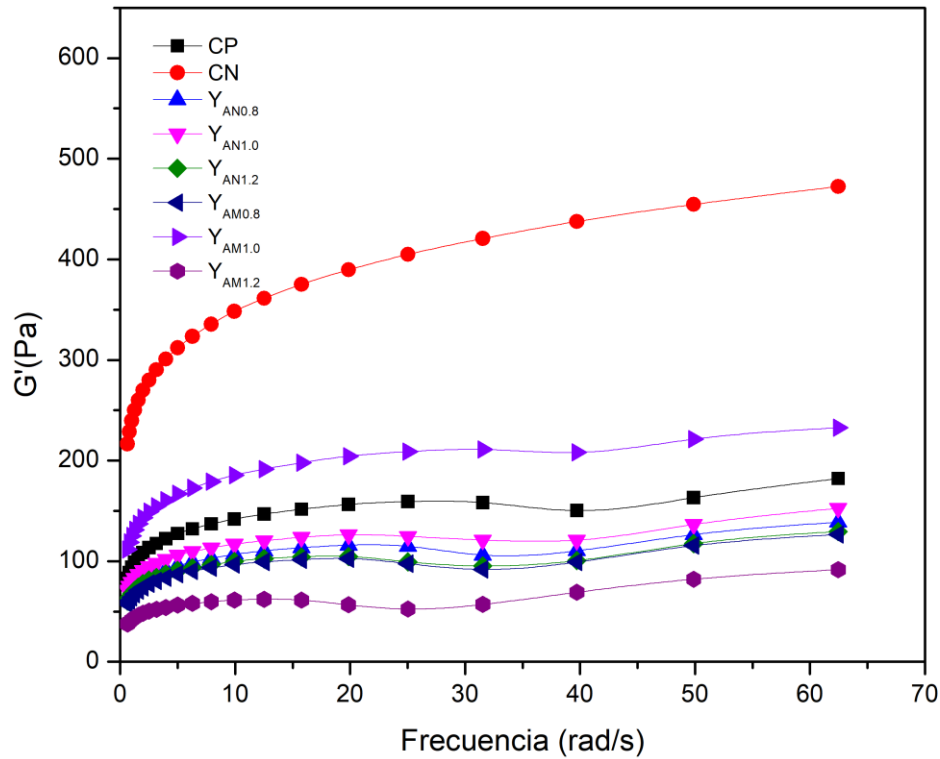


Figura 8 Gráfica de ISA, donde AM es el almidón modificado y AN almidón nativo. Letras diferentes entre tratamientos a la misma temperatura indican diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$). Por *t* de Student.

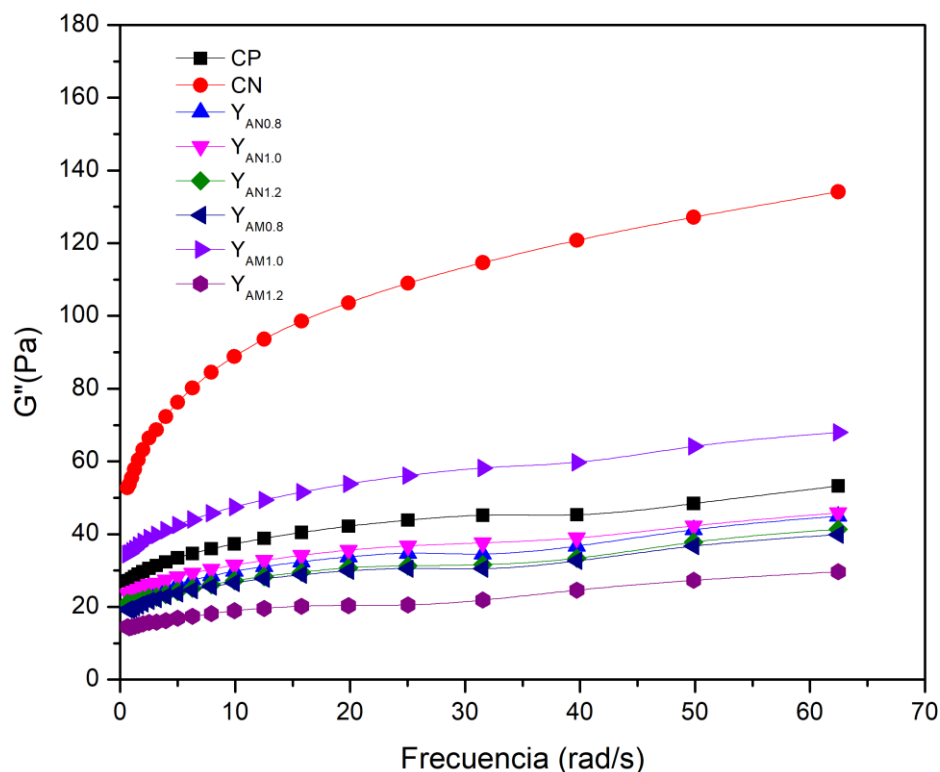


Figura 9 Gráfica de ISA, donde AM es el almidón modificado y AN almidón nativo. Letras diferentes entre tratamientos a la misma temperatura indican diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$). Por t de student.

7.13. Viscosidad aparente en formulaciones de yogurt.

La figura 9, presenta los valores de la viscosidad aparente de yogurt para los diferentes tratamientos, evaluados a velocidades de corte crecientes. En todos los tratamientos se observaron disminución de viscosidad al aumentar la velocidad de corte, este comportamiento pertenece a un fluido no newtoniano el cual es característico del yogurt. El tratamiento CN, presentó las viscosidades más altas en todos los niveles de velocidad, iniciando en $109,500 \pm 500$ cP (1 rad/s) y reduciendo a 4,000 cP (50 rad/s). Esto refleja una alta resistencia al flujo y poca estabilidad bajo agitación. Para el CP, mostró valores bajos en todos los puntos, comenzando con $21,500 \pm 500$ cP y bajando a $2,400 \pm 60$ cP, indicando una baja viscosidad general y mayor fluidez. En los tratamientos con almidón nativo, $Y_{AN0.8}$ y $Y_{AN1.0}$, presentaron valores intermedios, por ejemplo, $Y_{AN0.8}$ inicio en $28,400 \pm 500$ cP y

descendió a $3,386.66 \pm 120.55$ cP, por lo tanto, presentaron un mejor comportamiento que el CP, pero con menor viscosidad que el CN. Con los tratamientos de almidón modificado, mostraron un buen equilibrio viscoso, con valores intermedios y estabilidad. $Y_{AM1.2}$ presentó una viscosidad inicial de $29,000 \pm 1000$ cP y final de $2,813.33 \pm 61.10$ cP, mostrando una buena retención de viscosidad con el aumento de velocidad, $Y_{AM1.0}$ y $Y_{AM0.8}$ mantuvieron viscosidades más estables que el CP, pero sin alcanzar los niveles del CN. Por lo tanto, el yogur $Y_{AM1.2}$ mostró un perfil de viscosidad más estable en comparación con el tratamiento CP (fluido) y CN (extremadamente viscoso), lo que indica una mejor resistencia al flujo y un comportamiento reológico más adecuado para productos fermentados.

Durante el cizallamiento, la disminución de la viscosidad se le atribuyó a la disrupción de los gránulos de almidón hinchados, lo que provoca su desintegración. No obstante, los almidones modificados mostraron una mayor resistencia a este efecto, lo que indica que sus gránulos toleraron mejor las fuerzas de cizallamiento bajo las condiciones experimentales (Pang *et al.*, 2019). El aumento en la viscosidad también puede explicarse por la capacidad del almidón resistente para interactuar con las proteínas de la leche, formando complejos proteína-almidón que originan una red estructural estable. Esta interacción favorece la unión entre micelas de caseína y mejora la capacidad de gelificación del sistema. Además, en condiciones de pH ácido (< 4.6), las macromoléculas de caseína adquieren cargas positivas, lo que les permite interactuar con las moléculas de almidón con carga negativa, fortaleciendo la estructura del gel y contribuyendo así al aumento de la viscosidad (Fitch-Vargas *et al.*, 2025). Adicionalmente, Pang *et al.* (2019) reportaron que la viscosidad del almidón modificado aumentó de aproximadamente 1000 cP a 1268 cP. Este incremento se asocia con la retrogradación del almidón, fenómeno relacionado con la descomposición de los gránulos durante la gelatinización y con las interacciones entre las cadenas de almidón a bajas temperaturas durante el enfriamiento del yogur. Este proceso favorece la formación de una red más estructurada, producto de una organización molecular más ordenada, lo que sugiere un mayor grado de retrogradación.

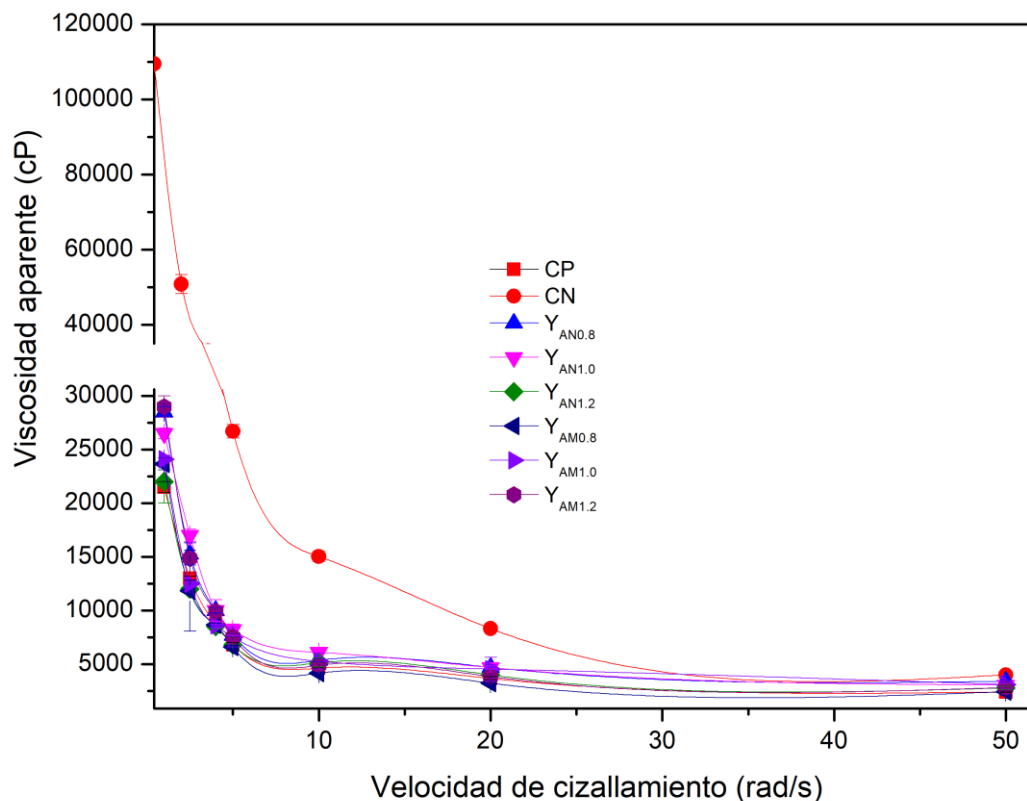


Figura 10 Gráfica de ISA, donde AM es el almidón modificado y AN almidón nativo. Letras diferentes entre tratamientos a la misma temperatura indican diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$). Por *t* de Student.

7.14. Estimación del índice glucémico *in vitro*, en muestras de yogurt.

En la tabla 10 se muestra la concentración de fructosa, glucosa, e inulina a lo largo del tiempo durante un proceso digestivo simulado, dividido en una fase gástrica la cual abarca del minuto 0 al 120, posteriormente a la fase gástrica, inicia la fase intestinal que se da después del minuto 120 y dura 4 horas. La digestión *in vitro* cuantifica el grado de descomposición enzimática o digestión del almidón en un sistema digestivo simulado en el cuerpo humano. Por lo tanto, la digestibilidad *in vitro* se refiere a la velocidad y el grado de descomposición del almidón durante la digestión, lo que podría afectar sus características nutricionales y sus posibles efectos para la salud (Shrivastava *et al.* 2024).

Durante la digestión *in vitro*, la liberación de carbohidratos mostró comportamientos diferenciados según el tipo de azúcar y el tratamiento evaluado. En el caso de la fructosa, las

concentraciones fueron generalmente bajas y altamente variables. Al inicio de la fase gástrica, solo $Y_{AN1.2}$ (0.022 g/L) y $Y_{AM1.0}$ (0.008 g/L) presentaron liberación detectable; sin embargo, ambos dejaron de liberar fructosa a los 60 minutos, momento en el que $Y_{AN0.8}$ registró la concentración más alta (0.061 g/L). Al entrar en la fase intestinal, CP, CN y $Y_{AN0.8}$ mostraron valores similares (0.019 g/L), mientras que otros tratamientos no presentaron liberación. Conforme avanzó la digestión intestinal, CN alcanzó la mayor concentración (0.078 g/L), seguido de $Y_{AN0.8}$, $Y_{AM0.8}$ y $Y_{AM1.2}$ ($\approx$ 0.06 g/L). Al finalizar el proceso, $Y_{AN0.8}$ (0.062 g/L) mantuvo una liberación estable, mientras que $Y_{AM1.0}$ (0.054 g/L) y especialmente $Y_{AM0.8}$ (0.178 g/L) mostraron incrementos notables. En contraste, CP, CN, $Y_{AN1.0}$, $Y_{AN1.2}$ y $Y_{AM1.2}$ no liberaron fructosa al término de la digestión.

En cuanto a la glucosa, se observó una liberación considerablemente mayor en comparación con la fructosa. Al inicio de la digestión gástrica, $Y_{AM1.0}$ (0.219 g/L) presentó la mayor liberación, seguido de $Y_{AN0.8}$ (0.144 g/L), $Y_{AN1.2}$ (0.141 g/L) y $Y_{AM1.2}$ (0.139 g/L). Los valores más bajos correspondieron a CP (0.062 g/L) y $Y_{AM0.8}$ (0.090 g/L). A los 60 minutos, CP y $Y_{AM0.8}$ continuaron con las liberaciones más bajas, mientras que CN, $Y_{AN0.8}$, $Y_{AN1.0}$ y $Y_{AM1.0}$ mostraron incrementos moderados. Los tratamientos con mayor liberación en este punto fueron $Y_{AM1.2}$ (0.195 g/L) y $Y_{AN1.2}$ (0.256 g/L). A los 120 minutos, $Y_{AN1.2}$ mantuvo la liberación más alta (0.263 g/L), mientras que CP y $Y_{AM0.8}$ permanecieron con valores bajos, lo cual es consistente con la ausencia de estabilizantes en el control positivo.

Al pasar a condiciones intestinales, la liberación de glucosa disminuyó inicialmente en la mayoría de los tratamientos; sin embargo, al final de esta fase se observaron incrementos marcados en $Y_{AN1.0}$ (0.916 g/L) y $Y_{AM1.2}$ (0.907 g/L). Estas liberaciones elevadas sugieren una baja presencia de almidón resistente, ya que este tipo de almidón limita la disponibilidad de glucosa durante la digestión. Los controles CN y CP mostraron las liberaciones más bajas, mientras que $Y_{AM0.8}$ presentó un comportamiento más estable, lo que podría indicar una matriz más estructurada o una interacción más eficiente entre el almidón y los componentes del yogurt.

La inulina mostró patrones de liberación distintos a los observados para los azúcares simples. El control positivo (CP) presentó un incremento notable hacia los 360 minutos (6.3455 g/L), lo que podría indicar una mayor detectabilidad del compuesto en etapas avanzadas de la digestión. En contraste, el control negativo (CN) mostró una caída abrupta a los 240 minutos (0.0785 g/L), seguida de un incremento elevado a los 360 minutos (7.0436 g/L), lo que sugiere posibles interferencias de la matriz en la cuantificación por HPLC. Los tratamientos $Y_{AN0.8}$ y $Y_{AN1.0}$ mostraron incrementos importantes a los 240 minutos (5.4702 y 8.0578 g/L, respectivamente), mientras que $Y_{AN1.2}$ presentó

un comportamiento atípico, con ausencia de liberación a los 120 minutos y un pico elevado a los 240 minutos (9.7721 g/L), lo que podría indicar inestabilidad de la matriz o variaciones analíticas.

Por su parte, $Y_{AM0.8}$ y $Y_{AM1.0}$ mostraron incrementos progresivos y más estables, alcanzando 4.9455 g/L y 7.5261 g/L a los 360 minutos. $Y_{AM1.2}$ también presentó un aumento importante al final del proceso (7.8664 g/L), lo que sugiere una liberación tardía y sostenida de inulina. Este comportamiento es deseable en productos con potencial funcional, ya que una liberación gradual puede favorecer efectos metabólicos regulados y contribuir a un menor índice glucémico.

Por lo anterior, los resultados evidencian que la digestibilidad de los carbohidratos en el yogurt está fuertemente influenciada por el tipo de tratamiento, la presencia y modificación del almidón y la interacción de estos componentes con la matriz láctea. La fructosa mostró liberaciones bajas y variables; la glucosa, liberaciones elevadas asociadas a una menor presencia de almidón resistente; y la inulina, patrones diferenciados que en algunos casos sugieren liberación progresiva y potencial funcional. Estos hallazgos permiten inferir que la formulación del yogurt y el tipo de almidón utilizado pueden modular la disponibilidad de carbohidratos durante la digestión, lo que tiene implicaciones directas en el perfil metabólico y en el desarrollo de alimentos con propiedades funcionales.

La propiedad digestiva del almidón se refiere a la velocidad a la que este hidroliza la maltosa y glucosa bajo la acción de enzimas digestivas. El almidón resistente influye en la salud intestinal y en el microbiota residente, particularmente en bacterias fermentadoras como *Faecalibacterium prausnitzii*, *Roseburia spp.* y *Eubacterium rectale*, participan en la producción de butirato. Se ha reportado que el almidón de *D. bulbifera* L. puede mantener una digestibilidad saludable gracias a su alto contenido de AR en comparación con el almidón de otros tubérculos. Así mismo pruebas de fermentación in vitro han demostrado que los AR podrían aumentar significativamente los ácidos grasos de cadena corta, en particular el ácido butírico, y las bacterias benéficas (Li *et al.*, 2023).

Shrivastava *et al.*, (2024), realizaron la digestión enzimática de cuatro almidones de *Dioscorea spp.*, durante la etapa inicial de 40 minutos, cuatro variedades de almidones experimentaron una digestión rápida. Posteriormente, observaron una desaceleración en la velocidad de digestión, estabilizando alrededor de los 80 min. De los cuatro tipos de almidones, solo *D. alata* mostró un menor porcentaje de digestión después de 2 horas de incubación en comparación con los otros tres almidones, atribuyendo esto a una mayor concentración de almidón resistente.

Tabla 10 Concentración carbohidratos simples libres, susceptibles de ser absorbidos en las muestras de yogurt.

Digestión	Estómago			Intestino delgado		Estómago			Intestino delgado		Estómago			Intestino delgado	
Tiempo (min)	0	60	120	240	360	0	60	120	240	360	0	60	120	240	360
Medición	Fructosa (g/L)					Glucosa (g/L)					Inulina (g/L)				
Tratamiento															
CP	0.0000	0.0160	0.0194	0.0000	0.0000	0.0620	0.0509	0.1182	0.0816	0.2972	0.8899	1.4688	2.7055	1.9840	6.3455
CN	0.0000	0.0249	0.0199	0.0785	0.0000	0.0983	0.1184	0.0670	0.0785	0.4590	2.2600	2.4672	1.9972	0.0785	7.0436
Y _{ANO.8}	0.0000	0.0619	0.0195	0.0631	0.0625	0.1444	0.1596	0.1043	0.5236	0.5819	1.6170	2.6543	2.3886	5.4702	5.4561
Y _{AN1.0}	0.0000	0.0028	0.0000	0.0018	0.0000	0.1197	0.1305	0.0643	1.0520	0.9161	1.4453	2.6391	2.0051	8.0578	7.1851
Y _{AN1.2}	0.0225	0.0000	0.0112	0.0111	0.0000	0.1415	0.2562	0.2635	1.1487	0.5223	2.1225	4.0880	0.0000	9.7721	4.3761
Y _{AM0.8}	0.0000	0.0107	0.0295	0.0606	0.1787	0.0905	0.0610	0.0697	0.5650	0.5923	1.8165	2.7072	2.8970	6.0193	4.9455
Y _{AM1.0}	0.0082	0.0000	0.0000	0.0042	0.0548	0.2190	0.1354	0.0544	0.9595	0.5783	2.4505	2.5476	2.1339	6.8528	7.5261
Y _{AM1.2}	0.0000	0.0052	0.0000	0.0631	0.0000	0.1392	0.1955	0.1092	0.7603	0.9071	2.0650	4.3319	2.6458	3.7461	7.8664

8. Conclusiones.

El rendimiento de almidón obtenido cae dentro del intervalo de lo reportado en la literatura, sin embargo, en comparación con otras fuentes de almidón convencionales es bajo. El mayor grado de sustitución se obtuvo con el tratamiento de 3 % OSA con un tiempo de reacción de 6 horas, donde se obtuvo un buen grado de sustitución de los grupos OH por grupos OSA. Los resultados obtenidos en el FT-IR soportan la modificación química del almidón modificado con OSA ya que se encontraron picos entre 1650 y 1815 cm^{-1} identificando los grupos carbonilo del almidón modificado con OSA. Dentro del análisis químico proximal se encontró una disminución en el porcentaje de proteínas en el almidón modificado con OSA debido a la utilización de NaOH como catalizador en la modificación. El contenido de almidón resistente en el almidón modificado no cambia estadísticamente respecto al almidón nativo. La CRA e ISA son mayores en el almidón modificado que en el almidón nativo. Por lo tanto, se podría utilizar para retener una mayor cantidad de agua y disminuyendo sinéresis en un producto procesado. La aplicación de almidón modificado en formulaciones de yogurt mostro que el almidón modificado con OSA, principalmente en concentraciones de 1.0 y 1.2 %, mejoró la estabilidad del producto durante el almacenamiento, reduciendo la sinéresis y mejorando las propiedades texturales reológicas y de viscosidad. De igual manera mostraron un perfil de digestión *in vitro* más controlado, lo que sugiere un posible beneficio metabólico. Estos resultados respaldan el uso del almidón modificado de *Dioscorea bulbifera* L. como un aditivo alimentario en la elaboración de productos lácteos fermentados.

9. Referencias.

- Abiddin, N. F. Z., Yusoff, A., & Ahmad, N. (2018). Effect of octenylsuccinylation on physicochemical, thermal, morphological and stability of octenyl succinic anhydride (OSA) modified sago starch. *Food Hydrocolloids*, 75, 138-146.
- Acevedo, D., Rodríguez, A., & Fernández, A. (2010). Efecto de las Variables de Proceso sobre la Cinética de Acidificación, la Viabilidad y la Sinéresis del Suero Costeño Colombiano. *Información tecnológica*, 21, 29-36.
- Alhejaili, M., Olson, D. W., Velázquez, C., Janes, M., Boeneke, C., & Aryana, K. J. (2019). *Short communication*: Influence of an aqueous myrrh suspension on yogurt culture bacteria over yogurt shelf life. *Journal of dairy science*, 102(3), 2011-2016. doi:10.3168/jds.2018-14831
- Altuna, L., Herrera, M. L., & Foresti, M. L. (2018). Synthesis and characterization of octenyl succinic anhydride modified starches for food applications. A review of recent literature. *Food Hydrocolloids*, 80, 97-110. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.01.032>
- AOAC. (2000). Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists (Vol. 11): The Association.
- Arab, M., Yousefi, M., Khanniri, E., Azari, M., Ghasemzadeh-Mohammadi, V., & Mollakhalili-Meybodi, N. (2023). A comprehensive review on yogurt syneresis: effect of processing conditions and added additives. *JOURNAL OF FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY-MYSORE*, 60(6), 1656-1665. doi:10.1007/s13197-022-05403-6
- Araujo de Vizcarrondo, C., Rincón, A. M., & Padilla, F. (2004). Caracterización del almidón nativo de *Dioscorea bulbifera* L. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 54(2), 241-245.
- Bao, J., Xing, J., Phillips, D. L., & Corke, H. (2003). Physical properties of octenyl succinic anhydride modified rice, wheat, and potato starches. *Journal of agricultural and food chemistry*, 51(8), 2283-2287.
- Bao, J., Zhou, X., Hu, Y., & Zhang, Z. (2022). Resistant starch content and physicochemical properties of non-waxy rice starches modified by pullulanase, heat-moisture treatment, and citric acid. *Journal of Cereal Science*, 105, 103472. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2022.103472>
- Bello-Perez, L. A., Ottenhof, M. A., Agama-Acevedo, E., & Farhat, I. A. (2005). Effect of storage time on the retrogradation of banana starch extrudate. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53(4), 1081-1086.

- Bernardo, C. O., Ascheri, J. L. R., Chávez, D. W. H., & Carvalho, C. W. P. (2018). Ultrasound Assisted Extraction of Yam (*Dioscorea bulbifera*) Starch: Effect on Morphology and Functional Properties. *STARCH-STARKE*, 70(5-6). doi:10.1002/star.201700185
- Bhosale, R., & Singhal, R. (2006). Process optimization for the synthesis of octenyl succinyl derivative of waxy corn and amaranth starches. *Carbohydrate Polymers*, 66(4), 521-527. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.04.007>
- Borges, A., Rosa, M. S., Recchia, G. H., Queiroz-Silva, J. R. d., Bressan, E. d. A., & Veasey, E. A. (2009). CTAB methods for DNA extraction of sweetpotato for microsatellite analysis. *Scientia Agricola*, 66, 529-534.
- Boulares, M., Bezzezi, A., Mahmoudi, I., Aloui, N. E. H., Ben Moussa, O., & Hassouna, M. (2025). Effect of Fortification with *Artemisia absinthium* Leaf Powder on Yoghurt Quality during Storage. *JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 27(1), 113-125.
- Bravo-Núñez, A., Pando, V., & Gómez, M. (2019). Physically and chemically modified starches as texturisers of low-fat milk gels. *INTERNATIONAL DAIRY JOURNAL*, 92, 21-27. doi:10.1016/j.idairyj.2019.01.007
- Bryant, C. M., & Hamaker, B. R. (1997). Effect of lime on gelatinization of corn flour and starch. *Cereal chemistry*, 74(2), 171-175.
- Cárdenas, A., Alvites, H., Valladares, G., Obregón, J., & Vásquez-Villalobos, V. (2013). Optimización mediante diseño de mezclas de sinéresis y textura sensorial de yogurt natural batido utilizando tres tipos de hidrocoloides. *Agroindustrial Science*, 3(1), 35-40.
- Cho, Y., & Kang, K. (2020). Functional Analysis of Starch Metabolism in Plants. *Plants*, 9(9), 1152. <https://doi.org/10.3390/plants9091152>
- Chi, C. D., Li, X. X., Zhang, Y. P., Chen, L., Li, L., & Miao, S. (2021). Progress in tailoring starch intrinsic structures to improve its nutritional value. *Food Hydrocolloids*, 113. doi:10.1016/j.foodhyd.2020.106447
- Cui, B., Lu, Y.-m., Tan, C.-p., Wang, G.-q., & Li, G.-H. (2014). Effect of cross-linked acetylated starch content on the structure and stability of set yoghurt. *Food Hydrocolloids*, 35, 576-582.
- De Farias, C. V. T., Oshiro, A. M., Sousa, L. C., de Almeida, V. D. S., & Takahashi, L. S. (2021). Amylose and amylopectin levels affect the growth performance and metabolism in pacu *Piaractus mesopotamicus*. *ANIMAL FEED SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 279. doi:10.1016/j.anifeedsci.2021.115020

- Dircio-Morales, M. A., Velazquez, G., Sifuentes-Nieves, I., Flores-Silva, P. C., Fonseca-Florido, H. A., & Mendez-Montealvo, G. (2023). Effect of retrograded starch with different amylose content on the rheological properties of stored yogurt. *Journal of Food Science and Technology*, 60(7), 2012-2022.
- Espinosa-Andrews, H., Haro-Gonzalez, J., Barbosa-Nunez, J., Aguirre-Mandujano, E., & Lobato-Calleros, C. (2024). Evaluation of the particle size, water state, viscosity and viscoelastic properties (SAOS and CONTENIDO LAOS) of yogurt samples with different protein contents (standard, protein-rich and high-protein Greek type). *REVISTA MEXICANA DE INGENIERIA QUIMICA*, 23(3).
- Estrada-Fernández, A. G., Dorantes-Bautista, G., Román-Guerrero, A., Campos-Montiel, R. G., Hernández-Urbe, J. P., & Jiménez-Alvarado, R. (2021). Modification of *Oxalis tuberosa* starch with OSA, characterization and application in food-grade Pickering emulsions. *Journal of Food Science and Technology*, 58, 2896-2905.
- Estrada-Sierra, N. A., Gonzalez-Avila, M., Urias-Silvas, J.-E., Rincon-Enriquez, G., Garcia-Parra, M. D., & Villanueva-Rodriguez, S. J. (2024). The Effect of *Opuntia ficus Mucilage* Pectin and *Citrus aurantium* Extract Added to a Food Matrix on the Gut Microbiota of Lean Humans and Humans with Obesity. *FOODS*, 13(4), 587.
- Farag, M. A., Saleh, H. A., El Ahmady, S., & Elmassry, M. M. (2022). Dissecting Yogurt: the Impact of Milk Types, Probiotics, and Selected Additives on Yogurt Quality. *FOOD REVIEWS INTERNATIONAL*, 38, 634-650. doi:10.1080/87559129.2021.1877301
- Greis, M., Nolden, A. A., Kinchla, A. J., Puputti, S., Seppä, L., & Sandell, M. (2023). What if plant-based yogurts were like dairy yogurts? Texture perception and liking of plant-based yogurts among US and Finnish consumers. *FOOD QUALITY AND PREFERENCE*, 107. doi:10.1016/j.foodqual.2023.104848
- He, J., Han, Y., Liu, M., Wang, Y., Yang, Y., & Yang, X. (2019). Effect of 2 types of resistant starches on the quality of yogurt. *Journal of dairy science*, 102(5), 3956-3964. doi:10.3168/jds.2018-15562
- Hernández-León, S., Little, D. P., Acevedo-Sandoval, O., Gernandt, D. S., Rodríguez-Laguna, R., Saucedo-García, M., . . . Espitia-López, J. (2018). Plant core DNA barcode performance at a local scale: identification of the conifers of the state of Hidalgo, Mexico. *Systematics and biodiversity*, 16(8), 791-806.
- Hernández-Urbe, J. P., Meza-Nieto, M., Palma-Rodríguez, H. M., Navarro-Cortez, R. O., Guzmán-Ortiz, F. A., Bello-Pérez, L. A., & Vargas-Torres, A. (2020). Physicochemical, Morphological, and Molecular Properties of Starch Isolated from *Dioscorea* and

- Oxalis Tubers from Hidalgo State, Mexico. *STARCH-STARKE*, 72(11-12). doi:10.1002/star.202000074
- Hosseini, F., & Ansari, S. (2019). Effect of modified tapioca starch on the physicochemical and sensory properties of liquid kashk. *JOURNAL OF FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY-MYSORE*, 56(12), 5374-5385. doi:10.1007/s13197-019-04008-w
- Imbachí-Narváez, P. C., Sepúlveda-Valencia, J. U., & Rodríguez-Sandoval, E. (2019). Effect of modified cassava starch on the rheological and quality properties of a dairy beverage prepared with sweet whey. *Food Science and Technology*, 39(1), 134-142. doi:10.1590/1678-457X.28017
- Jia, S. Y., Zhao, H. B., Tao, H. T., Yu, B., Liu, P. F., & Cui, B. (2022). Influence of corn resistant starches type III on the rheology, structure, and viable counts of set yogurt. *INTERNATIONAL JOURNAL OF BIOLOGICAL MACROMOLECULES*, 203, 10-18. doi:10.1016/j.ijbiomac.2022.01.027
- Le Thanh-Blicharz, J., & Lewandowicz, J. (2020). Functionality of Native Starches in Food Systems: Cluster Analysis Grouping of Rheological Properties in Different Product Matrices. *FOODS*, 9(8). doi:10.3390/foods9081073
- Lee, I., & Kang, T. (2024). Heat-moisture-treated rice starches with different amylose and moisture contents as stabilizers for nonfat yogurt. *Food Chemistry*, 436. doi:10.1016/j.foodchem.2023.137746
- León-Méndez, G., León-Méndez, D., Monroy-Arellano, M. R., De La Espriella-Angarita, S., & Herrera-Barros, A. (2020). Modificación química de almidones mediante reacciones de esterificación y su potencial uso en la industria cosmética. *Archivos Venezolanos de farmacología y Terapéutica*, 39(5), 620-629.
- Li, C., Hu, Y., & Zhang, B. (2021). Plant cellular architecture and chemical composition as important regulator of starch functionality in whole foods. *Food Hydrocolloids*, 117, 106744. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106744
- Lin, Q., Liang, R., Zhong, F., Ye, A., & Singh, H. (2018). Effect of degree of octenyl succinic anhydride (OSA) substitution on the digestion of emulsions and the bioaccessibility of β -carotene in OSA-modified-starch-stabilized-emulsions. *Food Hydrocolloids*, 84, 303-312.
- Loachamín Pillajo, B. A., & Ferrer Mairal, A. M. (2015). Estimación del Índice Glucémico en productos sin gluten elaborados con pseudocereales.
- Lopez-Silva, M., Bello-Perez, L. A., Agama-Acevedo, E., & Alvarez-Ramirez, J. (2019). Effect of amylose content in morphological, functional and emulsification properties of OSA modified corn starch. *Food Hydrocolloids*, 97, 105212.

- Meaño Correa, N., Ciarfella Pérez, A. T., & Dorta Villegas, A. M. (2014). Evaluación de las propiedades químicas y funcionales del almidón nativo de ñame congo (*Dioscorea bulbifera* L.) para predecir sus posibles usos tecnológicos. *Saber*, 26(2), 182-188.
- Miao, M., & BeMiller, J. N. (2023). Enzymatic Approaches for Structuring Starch to Improve Functionality. *ANNUAL REVIEW OF FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 14, 271-295. doi:10.1146/annurev-food-072122-023510
- Mirandaa, A. G., Sotoa, J. L. M., & Ruiza, I. G. (2008). PARCIAL CARACTERIZACION DE NUEVOS ALMIDONES OBTENIDOS DEL TUBERCULO DE CAMOTE DEL CERRO.
- Mutahi, A. W., & Miura, M. (2020). Effects of different chemically modified starches on the rheological properties of stirred non-fat yoghurt. *Food Science and Technology Research*, 26(2), 177-184.
- Nagai, N. F., & Andres, S. C. (2023). Non-conventional starches isolated from agronomic-improved beans (*Phaseolus vulgaris* L.): a study of their structure and physicochemical properties. *JOURNAL OF THE SCIENCE OF FOOD AND AGRICULTURE*, 103(11), 5253-5260. doi:10.1002/jsfa.12595
- Noda, H., Fuse, S., Yamashita, J., Pooma, R., Poopath, M., Tobe, H., & Tamura, M. N. (2020). A Revised Infrageneric Classification of Old World Species of *Dioscorea* (Dioscoreaceae). *ACTA PHYTOTAXONOMICA ET GEOBOTANICA*, 71(3), 187-199. doi:10.18942/apg.202003
- Odeghe, O. B., Adikwu, E., & Ojiego, C. C. (2020). Phytochemical and Antioxidant Assessments of *Dioscorea bulbifera* Stem Tuber. *Biomedical and Biotechnology Research Journal (BBRJ)*, 4(4).
- Olayo-Contreras, V. M., Alemán-Castillo, S. J., Rodríguez-Castillejos, G., & Castillo-Ruiz, O. (2022). Almidón resistente como prebiótico y sus beneficios en el organismo humano. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 24. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.406>
- Otegbayo, B. O., Tanimola, A. R., Ricci, J., & Gibert, O. (2024). Thermal Properties and Dynamic Rheological Characterization of *Dioscorea* Starch Gels. *GELS*, 10(1). doi:10.3390/gels10010051
- Otegbayo, B. O., Tran, T., Ricci, J., & Gibert, O. (2023). *In situ* dynamic rheological analysis of raw yam tubers: a potential phenotyping tool for quality evaluation. *JOURNAL OF THE SCIENCE OF FOOD AND AGRICULTURE*. doi:10.1002/jsfa.12662

- Pang, Z., Xu, R., Luo, T., Che, X., Bansal, N., & Liu, X. (2019). Physiochemical properties of modified starch under yogurt manufacturing conditions and its relation to the properties of yogurt. *Journal of Food Engineering*, 245, 11-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.10.003>
- Pérez, J., Arteaga, M., Andrade, R., Durango, A., & Salcedo, J. (2021). Effect of yam (*Dioscorea* spp.) starch on the physicochemical, rheological, and sensory properties of yogurt. *Heliyon*, 7(1).
- Romero, E. A. R., Martínez, L. A. O., & Castro, J. M. (2016). EFECTO DEL TRATAMIENTO CON ULTRASONIDO SOBRE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES y ESTRUCTURALES DE ALMIDÓN PROCEDENTE DE DIVERSAS FUENTES: UNA REVISIÓN/ EFFECT OF ULTRASONIC TREATMENT ON STRUCTURAL AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF STARCH FROM DIFFERENT SOURCES: A RE. *BIOtecnia*, 18(2), 16. <https://doi.org/10.18633/bt.v18i2.275>
- Roy, D., & Kumar, K. J. (2023). Isolation and Characterization of Colon Targeting Starch from the Non-Conventional Source of Jharkhand, India. *STARCH-STARKE*. doi:10.1002/star.202300096
- Saatloo, N. V., Mehdizadeh, T., Aliakbarlu, J., & Tahmasebi, R. (2023). Physicochemical, sensory and microbiological characteristics of coriander seed powder yogurt. *AMB EXPRESS*, 13(1). doi:10.1186/s13568-023-01572-5
- Sadgrove, N. J. (2022). Are South African Wild Foods the Answer to Rising Rates of Cardiovascular Disease? *DIVERSITY-BASEL*, 14(12). doi:10.3390/d14121014
- Sahoo, M., Titikshya, S., Kumar, V., & Naik, S. N. (2023). Physico-chemical compositions, nutraceutical properties, and starch-related techno-functional, thermal, and morphological characteristics of underutilized yam flour (*Dioscorea* spp.) from Odisha. *Food Bioscience*, 56, 103103. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103103>
- Salvador Martínez, G. (2018). Uso, manejo y calidad nutritiva de amaranto como verdura en la Sierra Norte de Puebla.
- Shukri, R., Zhu, L., Seib, P. A., Maningat, C., & Shi, Y.-C. (2015). Direct in-vitro assay of resistant starch in phosphorylated cross-linked starch. *Bioactive carbohydrates and dietary fibre*, 5(1), 1-9.
- Silveira, J. F. D., & de Francisco, A. (2020). Unconventional Food Plants as an Alternative in Starch Production. *CEREAL FOODS WORLD*, 65(2). doi:10.1094/CFW-65-2-0018

- Song, L. J., & Aryana, K. J. (2014). Reconstituted yogurt from yogurt cultured milk powder mix has better overall characteristics than reconstituted yogurt from commercial yogurt powder. *Journal of dairy science*, 97(10), 6007-6015. doi:10.3168/jds.2014-8181
- Tovar, A. R., & Herrera, G. (2017). Introduction to the Yogurt in Nutrition Initiative at the First Symposium of Yogurt in Mexico: The Balanced Diet Initiative. *ADVANCES IN NUTRITION*, 8(1), 144S-145S. doi:10.3945/an.115.011163
- Ulbrich, M., & Flöter, E. (2021). Modification of Starches with Different Amylose/Amylopectin Ratios Using the Dual Approach with Hydroxypropylation and Subsequent Acid-Thinning: II. Impacts on Gelatinization and Solution Properties. *STARCH-STARKE*, 73(1-2). doi:10.1002/star.202000145
- Villarroel, P., Gomez, C., Vera, C., & Torres, J. (2018). Resistant starch: Technological characteristics and physiological interests.
- Wang, C.-y., Ji, H., Liu, Y.-g., & Peng, S.-l. (2021). Advances in preparation and characterization of octenyl succinic anhydride modified starch.
- Wiacek, A. E., & Furmaniuk, A. (2024). Starch-Based Polysaccharide Systems with Bioactive Substances: Physicochemical and Wettability Characteristics. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MOLECULAR SCIENCES*, 25(9). doi:10.3390/ijms25094590
- Wong, S.-S., Wicklund, R., Bridges, J., Whaley, J., & Koh, Y. B. (2020). Starch swelling behavior and texture development in stirred yogurt. *Food Hydrocolloids*, 98, 105274. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105274
- Yan, X., Diao, M., Yu, Y., Gao, F., Wang, E., Wang, Z., . . . Zhao, P. (2022). Characterization of resistant starch nanoparticles prepared via debranching and nanoprecipitation. *Food Chemistry*, 369, 130824. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130824
- Yang, S., Yan, D., Zou, Y., Mu, D., Li, X., Shi, H., . . . Wu, J. (2021). Fermentation temperature affects yogurt quality: A metabolomics study. *Food Bioscience*, 42, 101104. doi:https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101104
- Zheng, W., Ren, L., Hao, W., Wang, L., Liu, C., & Zheng, L. (2022). Encapsulation of indole-3-carbinol in Pickering emulsions stabilized by OSA-modified high amylose corn starch: Preparation, characterization and storage stability properties. *Food Chemistry*, 386, 132846. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132846
- Zhu, F., & Liu, P. Z. (2020). Starch gelatinization, retrogradation, and enzyme susceptibility of retrograded starch: Effect of amylopectin internal molecular structure. *Food Chemistry*, 316. doi:10.1016/j.foodchem.2019.126036