



Efecto de las modificaciones con ácido acético e hidróxido de calcio sobre las propiedades funcionales y reológicas del almidón de ñame (*Dioscorea esculenta* L.)

Effect of Acetic Acid and Calcium Hydroxide Modifications on the Functional and Rheological Properties of Yam Starch (*Dioscorea Esculenta* L.)

 Carolina Agudelo-Zamudio ¹;
 Javier Esteban Argoty-Ortegón ²;
 Olga Lucía Torres-Vargas ³;
  Leonardo Alonso-Gómez ⁴

¹ Universidad de los Llanos, Villavicencio-Colombia,
carolina.agudelo@unillanos.edu.co

² Universidad de los Llanos, Villavicencio-Colombia,
javier.argoty@unillanos.edu.co

³ Universidad del Quindío, Armenia-Colombia,
oltorres@uniquindio.edu.co

⁴ Universidad de los Llanos, Villavicencio-Colombia,
lalonso@unillanos.edu.co

Cómo citar / How to cite

C. Agudelo-Zamudio, J. E. Argoty-Ortegón, O. L. Torres-Vargas, L. Alonso-Gómez, "Efecto de las modificaciones con ácido acético e hidróxido de calcio sobre las propiedades funcionales y reológicas del almidón de ñame (*Dioscorea esculenta* L.)," *Tecnológicas*, vol. 26, nro. 58, e2802, 2023. <https://doi.org/10.22430/22565337.2802>

Resumen

Las propiedades funcionales del almidón nativo tienen limitantes en sus propiedades tecnológicas. El almidón, al ser modificado, puede corregir estos problemas y, por lo tanto, mejorar sus propiedades para uso agroindustrial. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de las modificaciones con ácido acético e hidróxido de calcio sobre las propiedades funcionales y reológicas del almidón de ñame. Las modificaciones se realizaron agregando al almidón aislado a soluciones con concentraciones de 0.15, 0.20 y 0.30 % p/p de hidróxido de calcio y 5, 10 y 20 % v/v de ácido acético. Una porción de la muestra se dejó como testigo (sin modificar). Para determinar los efectos morfológicos se realizaron análisis de SEM, se analizaron el poder de hinchamiento, el índice de solubilidad en agua y el índice de absorción de agua. A los geles de las muestras se les midió el módulo de almacenamiento (G'), el módulo de pérdida (G'') y la viscosidad. Con los resultados obtenidos se demostró que la modificación no afectó la superficie de las micropartículas de almidón. Se presentó un aumento en el poder de hinchamiento para los almidones modificados con ácido y una disminución con los tratamientos alcalinos. El índice de solubilidad en agua aumentó con todos los tratamientos. El índice de absorción de agua solamente cambió con los tratamientos 10 % de ácido y 0.30 % de hidróxido. El G' y G'' fueron mayores para el almidón nativo que para cualquiera de las modificaciones. De acuerdo con los anteriores resultados se concluyó que los almidones modificados amplían la gama de productos que pueden ser elaborados por los productores de ñame.

Palabras clave

Agricultura y ciencias biológicas, agroindustria, análisis de alimentos, bioquímica, ñame.

Abstract

The functional properties of native starch have limitations in their technological properties. Starch, when modified, can correct these problems and therefore, improve its properties for agro-industrial use. This work aimed to evaluate the effect of acetic acid and calcium hydroxide modifications on the functional and rheological properties of yam starch. The modifications were made by adding the isolated starch to solutions with concentrations of 0.15, 0.20, and 0.30 % w/w calcium hydroxide and 5, 10, and 20 % v/v acetic acid. A portion of the sample was left as a control (unmodified). SEM analyses were performed to determine the morphological effects, and swelling power, water solubility index, and water absorption index were analyzed. The gels of the samples were measured by the storage module (G'), the loss modulus (G''), and the viscosity. The results showed that the modification did not affect the surface of the starch microparticles. There was an increase in swelling power for acid-modified starches and a decrease with alkaline treatments. The water solubility index increased with all treatments. The rate of water absorption only changed with the 10 % acid and 0.30 % hydroxide treatments. The G' and G'' were higher for native starch than for either modification. Based on the above results, it was concluded that modified starches expand the range of products that can be manufactured from yam.

Keywords

Agriculture and biological sciences, agroindustry, food analysis, biochemistry, yam.

1. INTRODUCCIÓN

El almidón es un material renovable altamente disponible en la naturaleza, ya que se puede encontrar en raíces, granos, tubérculos y frutos de varias especies de plantas. Este carbohidrato tiene gran importancia económica, y últimamente se ha ampliado su rango de usos por ser fácilmente biodegradable y naturalmente renovable. Aunque siempre ha desempeñado un papel importante en la industria alimentaria y se utiliza como ingrediente en el procesamiento de diversos productos, también puede ser usado en agroindustrias como la del plástico, la cosmética, la textil, la papelera y la farmacéutica [1]. Sin embargo, esta gran variedad de aplicaciones, en la mayoría de los casos, implica realizar modificaciones en las propiedades de los almidones. Estas modificaciones se aplican debido a que las propiedades de éste en su estado nativo tienen limitantes en algunas de sus capacidades como espesante o formador de geles, pues son sensibles a factores externos, por ejemplo, a cambios en la temperatura o el pH [2]. El almidón, al ser modificado puede corregir estos problemas y, por lo tanto, mejora sus propiedades para uso agroindustrial. Estos cambios que se logran en su estructura varían según la modificación que se le aplique y según su origen botánico [3]. Por ende, es de suma importancia estudiar las modificaciones en las propiedades de este importante carbohidrato, pero obtenido de fuentes no convencionales, libres de gluten como en este caso el ñame (*Dioscorea esculenta l.*).

Actualmente, las principales fuentes de almidón en Colombia son el maíz, la papa y la yuca [4]. Según [5], se están investigando productos que puedan ser utilizados como fuentes de harina y almidón no convencionales. Algunos ejemplos de fuentes no convencionales de almidón incluyen frutas como el plátano verde (*Musa paradisiaca L.*), semillas como el amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*), cormos como la mafafa (*Xanthosoma robustum*), y rizomas como *Canna edulis* y loto (*Nelumbo nucifera*), entre otros. Por tal motivo, el ñame (*Dioscorea esculenta l.*) representa una excelente elección para seguir con estas investigaciones, el ñame es una planta herbácea, leñosa y trepadora con tubérculos subterráneos, que pertenece al género *Dioscorea* (Figura 1), como materia prima tienen una ventaja con respecto a los cereales pues no tiene gluten [6].

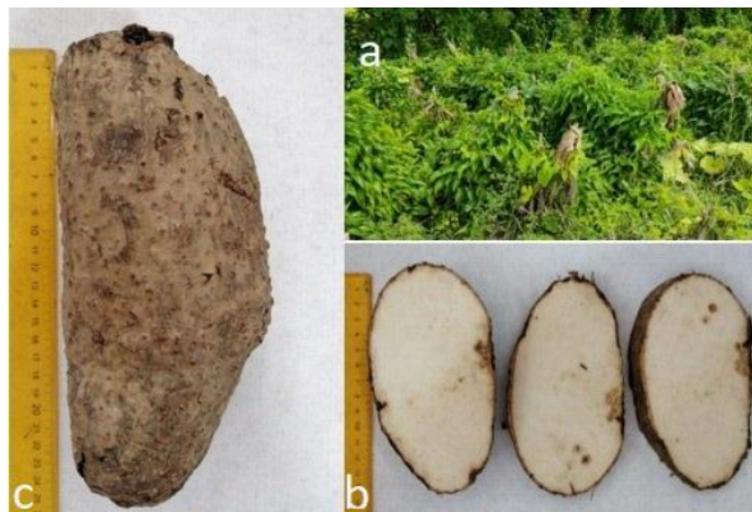


Figura. 1. Planta de ñame (a), corte transversal de un ñame (b) tubérculo de ñame completo (c). Fuente: elaboración propia.

Además, los tubérculos presentan ciertas características en su composición (diferente a la de los cereales) que han despertado interés al momento de ser modificados. Esto debido a que los grupos éster fosfato ligados a la amilopectina del almidón de los tubérculos interactúan y/o reaccionan con las moléculas adicionadas en la modificación. Las fuerzas de repulsión de Coulomb entre los grupos éster fosfato y otras moléculas, contribuyen a una menor retrogradación, a generar alta viscosidad en los geles y a que la gelatinización de las micropartículas de almidón se presente a menores temperaturas [7]. Además, los tratamientos alcalinos y ácidos no se han estudiado a profundidad en el ñame, ni su efecto sobre sus propiedades funcionales y reológicas.

En Colombia se desperdicia el 49 % de las raíces y tubérculos, lo que evidencia que es un sector de los que más contribuyen a la pérdida a escala nacional de alimentos, situándose en niveles preocupantes, debido a que su uso está más enfocado al consumo local [8]. Además, teniendo en cuenta que, la producción nacional de ñame creció en un 57 %, entre 2015 y 2021, pasando de 260 mil toneladas en 2015 a 410 mil en el año 2021 que se lleva registro [8], se evidencia que la producción de excedentes y/o residuos de esta materia prima también ha ido en aumento, por consiguiente, se está desperdiciando un gran potencial para su uso en la obtención de almidones modificados con fines agroindustriales.

Estudios recientes han demostrado que la inclusión de iones divalentes, como Ca^{2+} , afectan las propiedades mecánicas y de *pasting* [9], reducen la viscosidad, y modifican la temperatura de gelatinización [10] en materias primas como la *Pachyrhizus spp.*, conocida en México como jícama y en Colombia como yacón o pipilanga [11], y que los ácidos, como el acético aumentan las propiedades de solubilidad y capacidad de retención de agua de los almidones [12], propiedades sumamente buscadas por las industrias en aditivos para mejorar la calidad de los productos alimenticios.

En diversos estudios realizados por distintos autores, se han encontrado cambios significativos en el almidón de ñame tras la adición de ácidos orgánicos en diferentes especies, como por ejemplo [13] realizaron un tratamiento de acetilación, en donde las propiedades funcionales como absorción de agua, solubilidad y PHi aumentaron cuando se incrementó el grado de sustitución de grupos hidroxilo por grupos acetilo, y en este mismo estudio, la introducción de grupos acetilo en la estructura del almidón de la especie de ñame *Dioscorea alata*, provocó una disminución de la temperatura de gelatinización, mayor estabilidad y mayor tendencia a la retrogradación.

[14] también analizaron las propiedades funcionales y de pegado del almidón del ñame de agua (*Dioscorea alata*) nativo y modificado químicamente, encontrando cambios interesantes relacionados con un mejor desempeño técnico global después de la modificación, y sugieren esta técnica para que sea utilizada en la industria. Así mismo, gracias a la modificación con ácido cítrico, [15] fabricaron un bioplástico biodegradable de almidón de ñame que sirve como empaque auto detector del deterioro del pescado. De igual manera, [16] analizaron la influencia de las modificaciones físicas y químicas en aspectos fisicoquímicos de cuatro cultivares de ñame (*Dioscorea spp.*).

Por tal motivo, la estructura del almidón y sus modificaciones siguen siendo problemas vigentes y requieren una investigación profunda; de acuerdo con los trabajos antes referidos, es necesaria más información sobre los cambios que pueden ocurrir en las diferentes fuentes de almidón por efecto de un compuesto químico ya sea ácido o alcalino. En este sentido, el objetivo de esta investigación fue analizar las propiedades funcionales y reológicas del almidón de ñame (*Dioscorea Esculenta*) nativo y compararlo con los tratamientos de modificación con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y CH_3COOH , de esta manera aportar y proporcionar una alternativa de tratamiento a dicha materia prima, apoyando así a los productores, ampliando el portafolio de productos que tendrían para ofrecer al mercado.

2. ASPECTOS METODOLÓGICOS

La siguiente investigación se realizó con una muestra de almidón aislado de tubérculos de ñame. A estas muestras se les aplicaron dos modificaciones químicas: la primera a tres concentraciones diferentes de ácido acético, que fue la acetilación, y la segunda a tres concentraciones diferentes de hidróxido de calcio, que fue la oxidación. Una porción de la muestra se dejó como testigo (sin modificar).

2.1 Materiales, reactivos y equipos

Las muestras de harina de ñame se obtuvieron de productores de Montería, Córdoba, Colombia.

2.2 Obtención del almidón

El almidón de ñame se aisló mediante lavados de la harina con agua destilada. Posterior a cada lavado la lechada se centrifugó a 986 x g a 2 °C por 10 min, se decantó el agua y se volvió a lavar un total de 5 veces hasta que estuvo lo más blanco posible. No se utilizaron tamices para separar el almidón, el método utilizado fue la decantación en húmedo. Cabe resaltar que en el grupo de investigación se ha trabajado con almidón de yuca, el cuál con un solo lavado alcanza una blancura aceptable. Una vez realizados los 5 lavados, el agua fue decantada y se secaron las muestras en el horno a 40 °C hasta humedad constante. Las soluciones preparadas para las modificaciones se hicieron en una relación de 20 % (p/v) de almidón [17].

2.3 Modificación del almidón

Las modificaciones del almidón se basaron en las metodologías descritas por [11] para el hidróxido de calcio y para el ácido acético.

2.3.1 Adición de hidróxido de Calcio, Ca (OH)₂

El almidón aislado de ñame se agregó a soluciones de agua con concentraciones de 0.15, 0.20, 0.30 % p/p de Ca (OH)₂ por 24 h. Las dispersiones (una vez adicionados los almidones) se agitaron con un vórtex cada hora para la adecuada homogenización y se mantuvieron en refrigerador a 4 °C para evitar contaminación por microorganismos.

2.3.2 Adición de ácido acético, CH₃COOH

Se realizó siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente, modificando las concentraciones y el reactivo que se le agregó al almidón, las cuales fueron de: 5, 10, 20 % v/v de CH₃COOH. Las muestras no se neutralizaron, se pasaron inmediatamente a secado.

El almidón modificado con todos los tratamientos se secó en un horno de flujo natural, (MMM, ecocell 222, H202080) con precalentamiento a 40 °C, que fue la temperatura máxima, hasta humedad constante. Finalmente se maceraron y empacaron en bolsas resellables, debidamente rotuladas y se almacenaron a temperatura de 25 °C, para su posterior análisis.

2.4 Análisis morfológico de las micropartículas de almidón

Este análisis se realizó con microscopía electrónica de barrido en condiciones de alto vacío (JEOL, JSM-6060LV), con una resolución de 2000x. Las muestras se fijaron en un porta muestras con cinta de carbón y se rociaron con oro. Las condiciones de análisis utilizadas fueron un voltaje de aceleración del haz de electrones de 20 kV y una presión de 12–20 Pa.

2.5 Pruebas funcionales

Las propiedades funcionales de los almidones aislados; con 0.15, 0.20 y 0.30 % Ca (OH)₂; y 5, 10 y 20 % de CH₃COOH, fueron el poder de hinchamiento (PHi) representado por (1), el índice de solubilidad en agua (ISA) que se presenta en (2), y el índice de absorción de agua (IAA) representado por (3). Los índices se determinaron utilizando la metodología reportada por [18], y se midieron a 25°C, cada análisis se realizó por triplicado.

$$PHi = \frac{\text{masa sedimento}}{(\text{masa almidon seco} - \text{masa sobrenadante seco})} \times 100 \quad (1)$$

$$ISA = \frac{\text{masa sobrenadante seco}}{\text{masa total de almidon seco}} \times 100 \quad (2)$$

$$IAA = \frac{\text{masa sedimento}}{\text{masa total de almidon seco}} \times 100 \quad (3)$$

2.6 Pruebas reológicas

Estas pruebas fueron realizadas en dos etapas, la primera consistió en preparar las pastas de almidón, siguiendo la metodología propuesta por [19]; se preparó una suspensión de almidón al 8 % hasta alcanzar un peso total de 30 gr mediante la adición de agua destilada. La mezcla se calentó de 50 a 90 °C a una velocidad de calentamiento de 6 °C/min, luego se mantuvo durante 5 min a 90 °C y se enfrió hasta 50 °C a una velocidad de 6 °C/min para obtener la pasta que se analizó en el reómetro.

En la segunda etapa se determinaron las propiedades reológicas mediante un reómetro Anton Paar modelo MCR 102 (St Albans, Reino Unido) con placas paralelas (diámetro de 25 mm). En el cual se midieron el módulo de almacenamiento (G'), el módulo de pérdida (G'') y la viscosidad mediante la metodología propuesta por [20]. La tensión utilizada fue del 3 % y la frecuencia de 1 a 10 Hz. Los ensayos se realizaron en la región viscoelástica lineal por triplicado.

2.7 Análisis estadístico

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, el análisis estadístico se realizó utilizando un análisis de varianza (ANOVA), se aplicó una prueba de Tukey al 95 % de confianza para determinar si existían diferencias entre los tratamientos de modificación aplicados 0.15, 0.20 y 0.30 % Ca (OH)₂; y 5, 10 y 20 % de CH₃COOH, con respecto al almidón nativo. Los datos se tomaron por triplicado ± la desviación estándar. Todos los análisis se ejecutaron en el software Infostat 2020.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Morfología de las micropartículas

La morfología de las micropartículas de almidón de ñame se observa en la Figura 2. Se muestran las micropartículas de almidón nativo, y los tratamientos a mayor concentración de la base $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y el ácido CH_3COOH . Las micropartículas tienen una estructura ovalada elipsoidal, característica de tubérculos y rizomas [21]. La dimensión de las micropartículas vistas por microscopía está en el rango de los 20-30 μm . Los tamaños son similares a los de las micropartículas de almidón de yuca y de jengibre, y mayores que los de cebada o trigo [22]. Las superficies de las micropartículas son suaves, hay ausencia de poros. Estos resultados coinciden con los de [23], quienes no observaron afectaciones de las micropartículas de almidón de Taro, tras ser modificados por acetilación. La nula afectación de la superficie del granulo, se debe a que la modificación no involucró ningún tipo de tratamiento enzimático. La base $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y el ácido CH_3COOH , no degradan la superficie del granulo, contrario a lo que sucede con las enzimas bacterianas [24], o en procesos fermentativos o fisiológicos [25], con enzimas propias del proceso de germinación de semillas. Se pueden observar algunas formas sobre las micropartículas, que no se podrían clasificar como alteraciones del granulo, sino más bien, algunas estructuras adheridas al granulo, que pueden ser proteínas, o polisacáridos no amiláceos, relacionados con la dificultad que presentó la harina para su purificación.

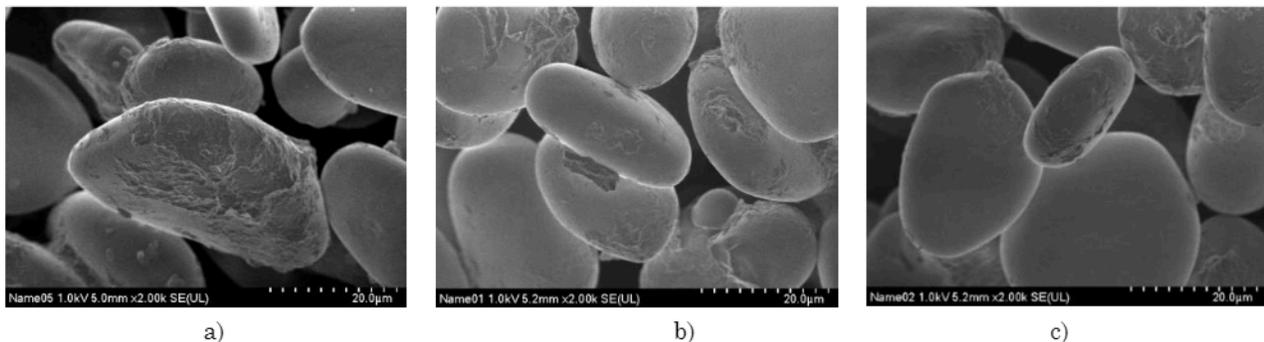


Figura 2. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de a) almidón nativo; b) modificación con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a la mayor concentración (0.30 %) y c) modificación con CH_3COOH a la mayor concentración (20 %).

Fuente: elaboración propia.

3.2 Propiedades funcionales

El PHi, presentó diferencia significativa entre los tratamientos con ácido y básico que estuvieron en rangos entre 13.43 a 13.11 y 8.69 a 10.41 respectivamente, y no tuvo diferencia significativa entre tratamiento ácidos. Se presentó un aumento de PHi para los almidones modificados con ácido, contrastando con la disminución que se presentó en el PHi con los tratamientos alcalinos, este resultado, es congruente con autores como [12], [26]-[28], los cuales reportaron que los tratamientos de acetilación aumentaron el PHi, en almidón de papa, amaranto, garbanzo y millo, respectivamente, y [12] explican que, esto se debe a que en el proceso de acetilación, se ocasiona la ruptura de los enlaces de hidrógeno y por ende, permite mayor ingreso del agua en el almidón, dando como resultado un PHi alto, mientras que por el lado

de la oxidación, [26], indicaron que, el almidón de amaranto oxidado, presentó una disminución en el PHi, y [29] respaldaron esta hipótesis con respecto a la acción que genera la oxidación en el almidón, disminuyendo su PHi, hecho atribuido a la despolimerización de las micropartículas de almidón durante el proceso de oxidación, esto explica por qué el almidón de ñame modificado sufrió una disminución del PHi bajo la modificación con $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Los resultados de las pruebas funcionales del almidón de ñame nativo y modificado se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de pruebas funcionales realizadas al almidón de ñame nativo y modificado.
Fuente elaboración propia.

Tratamiento	PHi	ISA	IAA
BS 0.15 %	10.41 ± 0.48 ^{b,c}	18.15 ± 3.89 ^{a,b}	8.53 ± 0.78 ^{c,d}
BS 0.20 %	9.35 ± 0.70 ^{c,d}	18.27 ± 0.45 ^{a,b}	7.65 ± 0.61 ^{d,e}
BS 0.30 %	8.69 ± 0.49 d	24.14 ± 1.34 ^a	6.59 ± 0.27 ^e
Nativo	11.24 ± 0.28 ^b	13.70 ± 1.36 ^b	9.70 ± 0.28 ^{b,c}
AC 5 %	13.43 ± 0.42 ^a	17.30 ± 0.67 ^b	11.10 ± 0.26 ^{a,b}
AC 10 %	13.83 ± 0.35 ^a	18.06 ± 1.62 ^b	11.34 ± 0.44 ^a
AC 20 %	13.11 ± 1.00 ^a	18.55 ± 3.20 ^{a,b}	10.67 ± 0.85 ^{a,b}

Análisis de varianza y de rango múltiple ($p \leq 0,05$; $n=3$), se realizó prueba de Tukey en Infostat. PHi: poder de hinchamiento; ISA: índice de solubilidad en agua; IAA: índice de absorción de agua. Nativo: Almidón sin ninguna modificación, BS: Almidón modificado con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, AC: Almidón modificado con CH_3COOH . Los resultados que no comparten una letra son significativamente diferentes.

El ISA, indica la cantidad de moléculas lixiviadas de las micropartículas hinchadas [26], los resultados indican que la solubilidad aumentó en todos los tratamientos con CH_3COOH y $\text{Ca}(\text{OH})_2$, los cuales estuvieron en un rango entre 24.14 y 17.30 superior a la del almidón nativo con un 13.70, y una diferencia significativa únicamente entre los tratamientos BS 0.30 % y AC 5 %, AC 10 % y el Nativo, y estos tres últimos no presentaron diferencias significativas entre sí, para el caso de los tratamientos con ácido, [27] atribuyó este fenómeno a que la ISA aumenta porque en ese tipo de modificación ocurre la adición de un grupo acetilo al almidón, y este rompe el enlace de hidrógeno entre el almidón y el agua, cambia su estructura interna, y para el caso del estudio de ellos, el almidón de garbanzo que modificaron por medio de acetilación aumentó su ISA, y [29] reportaron que algunos estudios han arrojado una solubilidad de almidones oxidados mayor, respecto al almidón sin modificar que analizaron, ya que, debido a la expansión de los gránulos, se produce una disminución en los enlaces dentro de cada gránulo, como consecuencia, las moléculas de almidón, principalmente amilosa, se lixivian en la fase líquida circundante, lo que resulta en una solubilidad elevada.

Por último, IAA, es definido como la capacidad de las micropartículas para absorber agua, y que mide el volumen ocupado por el almidón después de hincharse en exceso de agua [11], [30], el cual presentó una diferencia significativa únicamente entre los tratamientos AC 10 % con un 11.34 y el BS 0.30 % con un 6.59, y se puede observar como a partir del valor del almidón nativo con 9.70, los tratamientos alcalinos disminuyeron el IAA, mientras que los tratamientos ácidos aumentaron este índice, lo que contradice, parte de los resultados obtenidos por [14] debido a que en el caso de ese estudio, todas las modificaciones disminuyeron el IAA. De acuerdo con algunos autores [31], [32], que modificaron por medio de acetilación almidones de trigo y ñame, el índice de IAA, aumentó con dicho tratamiento, respecto al almidón de referencia que tenía cada uno, comportamiento que se atribuye a que la adición de grupos acetilo obstaculiza las interacciones entre las cadenas de almidón, lo que

resulta en una desestructuración que facilita la penetración del agua en la región no cristalina; mientras que para el caso de la inclusión de iones Ca^{2+} , [11] y [33], obtuvieron que el índice de IAA, para el almidón de jícama que modificaron con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y almidón de papa, respectivamente, aumentó, resultados que difieren con los resultados obtenidos en este estudio, y que puede atribuirse al tipo de materia prima utilizada, y el método de extracción.

Considerando los resultados de los ensayos funcionales y respaldados por estudios anteriores [30], la acetilación del almidón mejora la capacidad de hidratación y la estabilidad térmica del producto. Esto se debe a que la acetilación debilita la estructura del almidón, lo que aumenta su capacidad de absorber agua y reduce su propensión a la retrogradación. Estas características beneficiosas hacen que el almidón acetilado sea apropiado como agente espesante y estabilizador en alimentos, especialmente en productos que requieren almacenamiento a baja temperatura. Además, se ha utilizado almidón de maíz acetilado en la fabricación de bioplásticos [34]. En dicho estudio, se observó una mejora en la homogeneidad y las propiedades mecánicas de los bioplásticos a base de almidón acetilado. Sin embargo, la solubilidad de los bioplásticos disminuyó. Por otro lado, se informó que la acetilación del almidón de arroz y del almidón de papa mejoraron la fermentación de la microbiota intestinal [35], ya que estos almidones produjeron más ácidos grasos de cadena corta (SCFA) y fueron más fáciles de digerir y fermentar por la microbiota intestinal, y en cuanto a la industria cosmética, [29] concluyeron que las modificaciones por medio de acetilación no solo mejoran las características de viscosidad de los almidones, sino que también tienen un impacto positivo en la industria cosmética al permitir el desarrollo de formulaciones como talcos, cremas, maquillajes, polvos faciales, polvos compactos, entre otros, por lo tanto, el uso de almidones de ñame modificados mediante reacciones de esterificación representa una excelente alternativa para formular productos cosméticos de mayor calidad, con costos más favorables y un impacto ecológico positivo.

Por su parte, los almidones oxidados de ñame pueden ser utilizados en industrias como la textil, de papel, industria alimentaria, ya que mejora la estabilidad del congelamiento del almidón, como emulsionante, reemplazo de goma arábiga, y por supuesto en la elaboración de películas biodegradables, por sus partículas más homogéneas [29], [36].

3.3 Propiedades reológicas

En las Figuras 3 y 4 se puede apreciar respectivamente el comportamiento de los módulos de almacenamiento (G') y módulo de pérdida (G''), en función de la frecuencia angular. Estos módulos son útiles para describir la resistencia de la red de gel de almidón que se ha formado y el fenómeno de deformación que obtendrá frente a un estado tensional constante [37]. Los valores obtenidos en ambas gráficas respecto a todos los tratamientos incluyendo el nativo muestran que $G' > G''$, evidenciando una gran diferencia entre estos dos módulos y que tanto G' , como G'' , experimentaron un incremento progresivo a medida que aumentaba la frecuencia angular.

Según [38], el comportamiento observado en la Figura 3 indica que las pastas de almidón formuladas tienen una estructura homogénea, además de tener un comportamiento más elástico que viscoso, ya que se evidencia el claro dominio del módulo de G' en el sistema viscoelástico. Estos mismos resultados se evidenciaron en diferentes investigaciones [39], [40], que trabajaron con tubérculos andinos mashua (*Tropaeolum tuberosum*), oca (*Oxalis tuberosa M.*) y olluco (*Ullucus tuberosum C.*) y de chíca (*Salvia hispanica L.*) respectivamente, pero, los almidones que utilizaron en estos estudios no fueron modificados, lo que demuestra que el efecto de las modificaciones con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y CH_3COOH sobre las propiedades reológicas no son radicales.

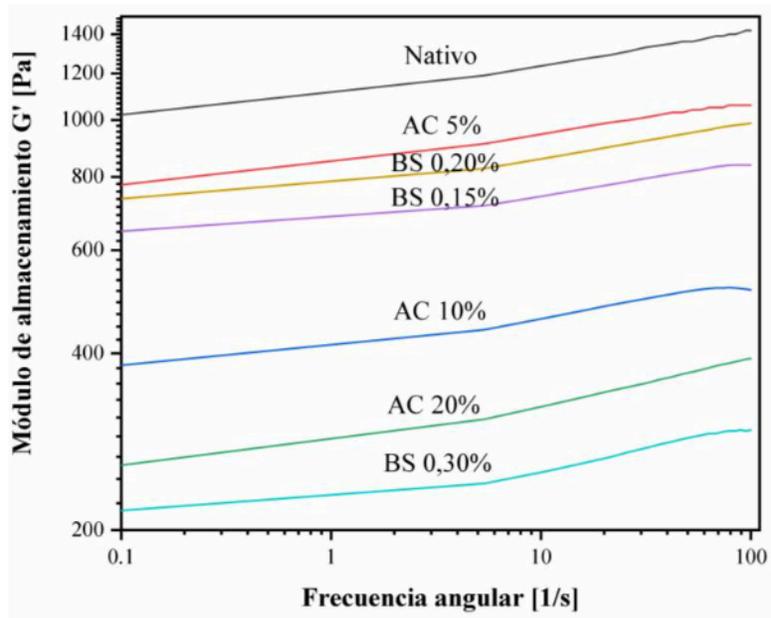


Figura 3. Reología del almidón de ñame nativo y modificado de ñame G' = Modulo de Almacenamiento. Fuente: elaboración propia.

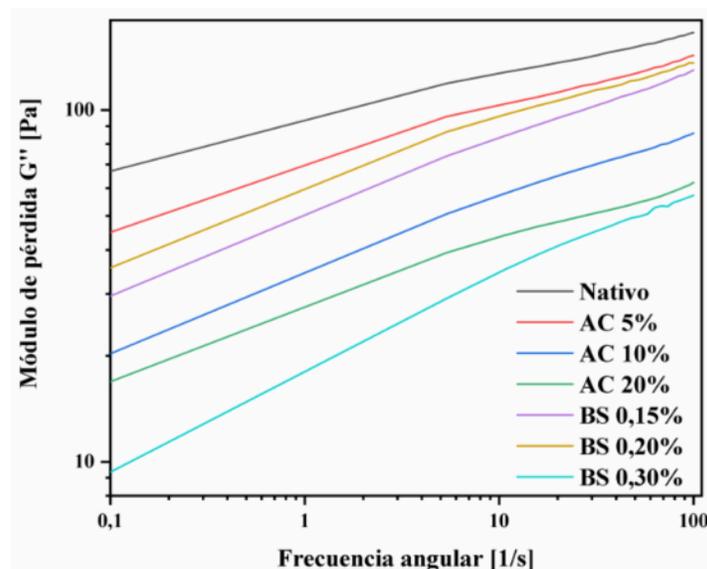


Figura 4. Reología del almidón de ñame nativo y modificado de ñame G'' = Modulo de pérdida. Fuente: elaboración propia.

Otro aspecto importante es que la G' y G'' del almidón nativo fue mayor que la de los almidones modificados con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y CH_3COOH y que los cambios más fuertes se presentaron con AC 10 %, AC 20 % y BS 0.30 % los cuales disminuyeron bruscamente el módulo G' . Esto se debe ya que el sistema elástico tiende a cambiar a medida que van apareciendo nuevas fuerzas, en este caso enlaces o interacciones electrostáticas de los compuestos químicos utilizados en la modificación, generando un comportamiento de tipo viscoso. Esta reacción también se evidencia en la investigación realizada por [11].

En la Figura 5, las curvas de viscosidad para todos los tratamientos muestran un comportamiento característico de un fluido no newtoniano tixotrópico, los cuales sufren de un efecto diluyente por cizallamiento. Tixotropía es la propiedad de algunos fluidos no

newtonianos y pseudoplásticos que manifiestan un cambio en su viscosidad con el tiempo, es un fluido que tarda un tiempo determinado en alcanzar una viscosidad de equilibrio cuando hay un cambio momentáneo en el ritmo de cizalla [41].

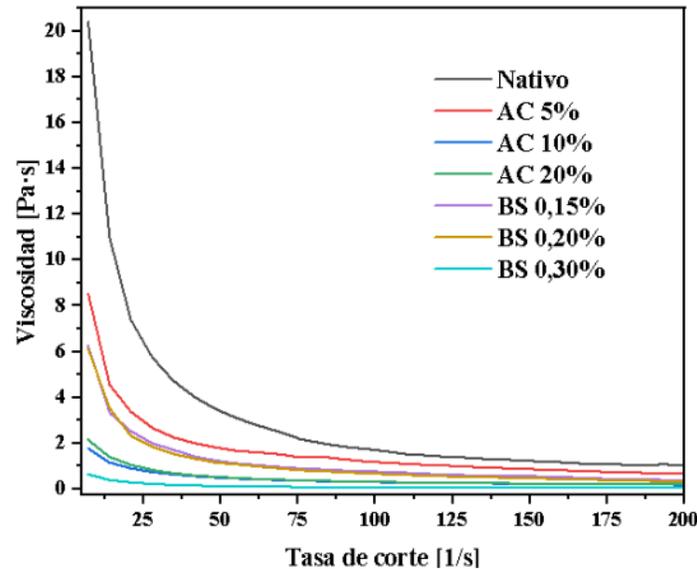


Figura 5. Viscosidad del almidón nativo y modificado de ñame en función de tasa de corte. Fuente: elaboración propia.

También se observa, en los resultados anteriores que el almidón nativo presentó la viscosidad más alta, y que los tratamientos con una mayor concentración de reactivo, AC 20 %, AC 10 % y BS 0.30 %, registraron una disminución notable de la viscosidad a comparación de los demás tratamientos, por tanto, generan una disminución mayor en su tasa de corte. Este resultado concuerda con lo expresado por [42], que indica que la mayoría de los polímeros presentan este tipo de comportamientos de fluidos no newtonianos, donde no hay linealidad y su viscosidad puede depender de la tasa de cizallamiento o del tiempo, y en algunas ocasiones puede presentar una combinación de comportamiento viscoelástico.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo de investigación indican que los cambios generados en el almidón de ñame debido a la modificación ácida y básica se ven reflejados en aspectos funcionales, por ejemplo, incrementando el ingreso de agua a la micropartícula cuando se modificó con ácido acético incrementando su PHI, contrario a lo que sucede al hacer tratamiento oxidativo. A nivel morfológico, tanto la acetilación, como la oxidación que se le realizaron al almidón no causaron cambios en las superficies de las micropartículas del almidón de ñame. En las propiedades reológicas el almidón nativo presentó los niveles más altos respecto a los demás tratamientos en G' , G'' y viscosidad. En referencia a los tratamientos, no se evidenciaron cambios drásticos, excepto para el caso de AC 10 %, AC 20 % y BS 0.30 %, los cuales presentaron una reducción notable en la viscosidad, comportamiento de G' y G'' . Lo interesante es que el almidón sigue conformando su estructura elástica, ya que en todos los tratamientos es notable el comportamiento $G' > G''$. Las modificaciones realizadas al almidón de ñame lo convierten en un posible sustituto para reemplazar almidones

convencionales, dando así una posibilidad de diversificación para productores de este tubérculo.

5. AGRADECIMIENTOS Y FINANCIACIÓN

Los autores agradecen el apoyo del Dr. Mario Enrique Rodríguez García, del CFATA de la UNAM. Alonso-Gómez L. agradece al productor de almidón Manuel Galarza por el aporte con sus conocimientos en producción y aislamiento de almidones. Agudelo-Zamudio y Argoty-Ortegón agradecen a la Universidad de los Llanos por la financiación del proyecto C03-F01-004-2022 gracias al cual se establecieron las metodologías del presente estudio y agradecen al ingeniero Iván Andrés Rodríguez Agredo del laboratorio de alimentos de la Universidad del Quindío.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses con respecto a la publicación de este trabajo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Agudelo-Zamudio C. y Argoty-Ortegón J.: recogieron datos, contribuyeron con herramientas de procesamiento o análisis de datos y con la redacción del artículo; Torres- Vargas O. concepción y diseño del análisis, recolección de datos, aporte de datos o herramientas de análisis; Alonso-Gómez L.: concibió y diseñó el análisis, aportó datos o herramientas de análisis, escribió el artículo, gestionó la administración total del proyecto y la adquisición de fondos.

6. REFERENCIAS

- [1] P. Villarroel, C. Gómez, C. Vera, and J. Torres, "Almidón resistente: Características tecnológicas e intereses fisiológicos," *Rev. Chil. Nutr.*, vol. 45, no. 3, Sep. 2018. <http://dx.doi.org/10.4067/s0717-75182018000400271>
- [2] M. de L. Ramos-García, C. Romero-Bastida, and S. Bautista, "Almidón modificado: Propiedades y usos como recubrimientos comestibles para la conservación de frutas y hortalizas frescas," *Rev. Iberoam. Tecnol. Postcosecha*, vol. 19, no. 1, Jun. 2018. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81355612003>
- [3] L. Ávila-Martín, Á. A. Beltrán-Osuna, and J. E. Perilla, "Effect of the Addition of Citric Acid and Whey Protein Isolate in *Canna indica* L. Starch Films Obtained by Solvent Casting," *J. Polym. Environ.*, vol. 28, pp. 871–883, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01648-z>
- [4] N. Canales and M. Trujillo, "La red de valor de la yuca y su potencial en la bioeconomía de Colombia," Instituto de Ambiente de Estocolmo, Estocolmo, Suecia, May. 2021. Available: <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2021/05/workingpaperyucaBioeconomia-canalestrujillo-mayo21.pdf>
- [5] J. D. Hoyos-Leyva, L. Alonso-Gomez, J. Rueda-Enciso, H. Yee-Madeira, L. A. Bello-Perez, y J. Alvarez-Ramirez, "Morphological, physicochemical and functional characteristics of starch from *Marantha ruiziana* Koern", *LWT - Food Science and Technology*, vol. 83, pp. 150-156, sep. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.019>.
- [6] J. Bora, N. K. Mahnot, H. A. Makroo, and C. L. Mahanta, "Impact of hydrothermal treatments on the functional, thermal, pasting, morphological and rheological properties of underutilized yam starches," *J. Food Meas. Charact.*, Vol. 17, pp. 2285–2300, Dec. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01789-1>
- [7] B. Contreras-Jiménez, O. L. Torres-Vargas, and M. E. Rodríguez-García, "Physicochemical

- characterization of quinoa (*Chenopodium quinoa*) flour and isolated starch,” *Food Chem.*, vol. 298, p. 124982, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.124982>
- [8] Minagricultura, “Cadena Productiva del Ñame,” Bogotá, Mar. 2021. Available: https://sioc.minagricultura.gov.co/Yuca/Documentos/2021-03-31_Cifras_Sectoriales_ñame.pdf
- [9] M. de los Á. Cornejo-Villegas, N. Rincón-Londoño, A. Del Real-López, and M. E. Rodríguez-García, “The effect of Ca²⁺ ions on the pasting, morphological, structural, vibrational, and mechanical properties of corn starch–water system,” *Journal of Cereal Science*, vol. 79, pp. 174–182, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.10.003>
- [10] S. García-Díaz, C. Hernández-Jaimes, H. B. Escalona-Buendía, L. A. Bello-Perez, E. J. Vernon-Carter, and J. Álvarez-Ramírez, “Effects of CaCO₃ treatment on the morphology, crystallinity, rheology and hydrolysis of gelatinized maize starch dispersions,” *Food Chemistry*, vol. 207, pp. 139–147, Sep. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.095>
- [11] B. Contreras-Jiménez, G. Vázquez-Contreras, M. de los Á. Cornejo-Villegas, A. del Real-López, and M. E. Rodríguez-García, “Structural, morphological, chemical, vibrational, pasting, rheological, and thermal characterization of isolated jicama (*Pachyrhizus spp.*) starch and jicama starch added with Ca(OH)₂,” *Food Chemistry*, vol. 283, pp. 83–91, Jun. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.013>
- [12] P. Martínez, F. Peña, Y. Gómez, G. Vargas, and C. Velezmore, “Propiedades fisicoquímicas, funcionales y estructurales de almidones nativos y acetilados obtenidos a partir de la papa (*Solanum tuberosum*) var. ‘única,’” *Rev. la Soc. Quim. del Perú.*, vol. 85, no. 3, pp. 338–351, Jul. 2019. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2019000300006&script=sci_abstract
- [13] J. G. Salcedo-Mendoza, M. C. Rodríguez-Lora, and J. A. Figueroa-Flórez, “Efecto de la acetilación en las propiedades estructurales y funcionales de almidones de yuca (*Manihot esculenta Crantz*) y ñame (*Dioscorea alata cv. Diamante 22*),” *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 15, no. 3, pp. 787–796, Jun. 2016. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/620/62048168010.pdf>
- [14] O. O. Awolu and S. J. Olofinlae, “Physico-chemical, functional and pasting properties of native and chemically modified water yam (*Dioscorea alata*) starch and production of water yam starch-based yoghurt,” *Starch*, vol. 68, no. 7-8, pp. 719-726, Jul. 2016. <https://doi.org/10.1002/star.201500302>
- [15] R. Poudel, N. Dutta, and N. Karak, “A mechanically robust biodegradable bioplastic of citric acid modified plasticized yam starch with anthocyanin as a fish spoilage auto-detecting smart film,” *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 242, p. 125020, Jul. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125020>
- [16] K. O. Falade and O. E. Ayetigbo, “Influence of physical and chemical modifications on granule size frequency distribution, fourier transform infrared (FTIR) spectra and adsorption isotherms of starch from four yam (*Dioscorea spp.*) cultivars,” *J Food Sci Technol.*, vol. 59, pp. 1865-1877, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05200-7>
- [17] J. Prieto-Méndez, C. L. Trejo-Cárdenas, F. Prieto-García, M. A. Méndez-Marzo, L. A. Bello-Pérez, and A. D. Román-Gutiérrez, “Acetilación y caracterización del almidón de cebada,” *Rev. Latinoam. Recur. Nat.*, vol. 6, no. 1, pp. 32–43, 2010. <https://www.itson.mx/publicaciones/rlnr/Documents/v6-n1-4-acetilacion-y-caracterizacion-del-almidon-de-cebada.pdf>
- [18] L. Wang *et al.*, “Physicochemical properties and structure of starches from Chinese rice cultivars,” *Food Hydrocolloids*, vol. 24, no. 2–3, pp. 208–216, Mar. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.09.007>
- [19] P. A. Magallanes-Cruz, L. A. Bello-Pérez, E. Agama-Acevedo, J. Tovar, and R. Carmona-García, “Effect of the addition of thermostable and non-thermostable type 2 resistant starch (RS2) in cake batters,” *Lwt*, vol. 118, p. 108834, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108834>
- [20] B. Contreras-Jiménez *et al.*, “Effect of tempering time, Ca(OH)₂ concentration and particle size on the rheological properties of extruded corn flour,” *Cereal Chemistry*, vol. 94, no. 2, pp. 230-236, Jan. 2017. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-03-16-0058-R>
- [21] F. H. G. Peroni, T. S. Rocha, and C. M. L. Franco, “Some Structural and Physicochemical Characteristics of Tuber and Root Starches,” *Food Sci. Technol. Int.*, vol. 12, no. 6, pp. 505–513, Dec. 2006. <https://doi.org/10.1177/1082013206073045>
- [22] Y. I. Cornejo-Ramírez, O. Martínez-Cruz, C. L. Del Toro-Sánchez, F. J. Wong-Corral, J. Borboa-Flores, and F. J. Cinco-Moroyoqui, “The structural characteristics of starches and their functional properties,” *CYTA - J. Food*, vol. 16, no. 1, pp. 1003–1017, Nov. 2018. <https://doi.org/10.1080/19476337.2018.1518343>
- [23] A. Rincón-Aguirre, L. A. Bello Pérez, S. Mendoza, A. del Real, and M. E. Rodríguez García, “Physicochemical Studies of Taro Starch Chemically Modified by Acetylation, Phosphorylation, and Succinylation,” *Starch*, vol. 70, no. 3–4, p. 1700066, Nov. 2017. <https://doi.org/10.1002/star.201700066>
- [24] L. Alonso-Gómez, A. M. Niño-López, A. M. Romero-Garzón, P. Pineda-Gómez, A. del Real-Lopez, and M. E. Rodríguez-García, “Physicochemical transformation of cassava starch during fermentation for production of sour starch in Colombia,” *Starch*, vol. 68, no. 11–12, pp. 1139–1147, Nov. 2016. <https://doi.org/10.1002/star.201600059>

- [25] E. Hernández-Becerra *et al.*, “Physicochemical and morphological changes in corn grains and starch during the malting for Palomero and Puma varieties,” *Cereal Chem.*, vol. 97, no. 2, pp. 404–415, Mar-Apr. 2020. <https://doi.org/10.1002/CCHE.10256>
- [26] R. Sindhu, A. Devi, and B. S. Khatkar, “Morphology, structure and functionality of acetylated, oxidized and heat moisture treated amaranth starches,” *Food Hydrocoll.*, vol. 118, p. 106800, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106800>
- [27] C. Zhang, M. Du, T. Cao, y W. Xu, “The Effect of Acetylation on the Physicochemical Properties of Chickpea Starch”, *Foods*, vol. 12, no. 2462, jun. 2023, <https://doi.org/10.3390/foods12132462>
- [28] A. Sulbarán, G. E. Matiz, and Y. Baena, “Acetilación del almidón de millo (*Pennisetum glaucum*) y evaluación de su aplicación como posible excipiente,” *Rev. Colomb. Ciencias Químico-Farmacéuticas*, vol. 47, no. 2, May. 2018. <https://doi.org/10.15446/rciquifa.v47n2.73969>
- [29] G. León-Méndez, D. León-Méndez, M. R. Monroy-Arellano, S. De La Espriella-Angarita, and A. Herrera-Barros “Modificación química de almidones mediante reacciones de esterificación y su potencial uso en la industria cosmética,” *Arch. Venez. Farmacol. y Ter.*, vol. 39, no. 5, pp. 620–626, Sep. 2020. <https://www.redalyc.org/journal/559/55965386017/html/>
- [30] E. Subroto, Y. Cahyana, R. Indiarto, and T. A. Rahmah, “Modification of Starches and Flours by Acetylation and Its Dual Modifications : A Review of Impact on Physicochemical Properties and Their Applications,” *Polymers*, vol. 15, no. 14, p. 2990, Jul. 2023. <https://doi.org/10.3390/polym15142990>
- [31] E. Abedi, K. Pourmohammadi, and S. Abbasi, “Dual-frequency ultrasound for ultrasonic-assisted esterification,” *Food Sci. Nutr.*, vol. 7, no. 8, pp. 2613–2624, Jun. 2019. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1115>
- [32] F. D. Adewumi, L. Lajide, A. O. Adetuyi, and O. Ayodele, “Functional properties of three native starches and their modified derivatives,” *Potravin. Slovak J. Food Sci.*, vol. 14, pp. 682–691, Sep. 2020. <https://doi.org/10.5219/1232>
- [33] C. A. Arenas Riaño, D. J. Pedraza Guarnizo, “Evaluación Del Proceso De Modificación De Almidón De Papa Mediante Acetilación Y Oxidación, Para Su Aplicación Como Excipiente En La Industria Farmacéutica A Nivel Laboratorio,” (Tesis de grado), Fundacion universitaria de América, Bogotá, Colombia, 2017. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/6043>
- [34] P. R. Fitch-Vargas *et al.*, “Effect of compounding and plastic processing methods on the development of bioplastics based on acetylated starch reinforced with sugarcane bagasse cellulose fibers,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 192, p. 116084, Feb. 2023. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2022.116084>
- [35] R. Wang *et al.*, “Association of starch crystalline pattern with acetylation property and its influence on gut microbota fermentation characteristics,” *Food Hydrocoll.*, vol. 128, p. 107556, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2022.107556>
- [36] S. L. M. El Halal *et al.*, “Structure, morphology and functionality of acetylated and oxidised barley starches,” *Food Chem.*, vol. 168, pp. 247–256, Feb. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.046>
- [37] X. Ding, X. Li, Q. Cai, Z. Ma, T. Ren, and X. Hu, “Effect of Calcium Hydroxide on Physicochemical and In Vitro Digestibility Properties of Tartary Buckwheat Starch-Rutin Complex Prepared by Pre-Gelatinization and Co-Gelatinization Methods,” *Foods*, vol. 12, no. 5, p. 951, Feb. 2023. <https://doi.org/10.3390/foods12050951>
- [38] Á. G. Salcedo, O. L. Torres Vargas, and K. F. López, “Quinoa and Amaranth as Protein Source in the Elaboration of a Cooked Ham-Type Meat Analog,” *Adv. J. Food Sci. Technol.*, vol. 16, pp. 273–279, Nov. 2018. <https://doi.org/10.19026/ajfst.16.5967>
- [39] F. Velásquez-Barreto and C. Velezmoro, “Propiedades reológicas y viscoelásticas de almidones de tubérculos andinos,” *Sci. Agropecu.*, vol. 9, no. 2, pp. 189–197, Jul. 2018. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.02.03>
- [40] Á. J. García-Salcedo, O. L. Torres-Vargas, A. del Real, B. Contreras-Jiménez, and M. E. Rodríguez-García, “Pasting, viscoelastic, and physicochemical properties of chia (*Salvia hispanica L.*) flour and mucilage,” *Food Struct.*, vol. 16, pp. 59–66, Apr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2018.03.004>
- [41] P. Talens Oliag, “Caracterización del comportamiento reológico de un alimento fluido tixotrópico,” *Univ. Politec. Val.*, p. 103382, 2018. <https://riunet.upv.es/handle/10251/103382>
- [42] W. Arias, M. Aguilar, M. Ramírez, and D. Quintana-Zavala, “El papel de la reología en la caracterización de fluidos: Análisis reológico de dispersiones de almidón de distintas fuentes,” *Latin-American Journal of Physics Education*, vol. 14, no. 4, Dic. 2020. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7840899>