

# Efecto del tiempo de acetilación en las características fisicoquímicas de almidón de *Arracacia xanthorrhiza*

## Effect of acetylation time on the physicochemical characteristics of *Arracacia xanthorrhiza* starch

 Rodolfo Moisés Vegas Niño<sup>1,\*</sup>,  Roger Audes Baltazar Flores<sup>2</sup>,  César Manuel Apolitano Urbina<sup>3</sup>

### Resumen

Revalorar alimentos andinos de gran valor nutritivo es una tarea pendiente en el país. Es el caso de la arracacha, raíz también llamada “zanahoria andina” es rica en almidón y de fácil digestibilidad. El estudio evaluó el impacto del tiempo de acetilación (0,5-6 horas) del almidón de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) con anhídrido acético a 120 °C sobre sus propiedades fisicoquímicas. Se observó que el grado de sustitución (GS) aumentó con el tiempo, alcanzando un valor máximo de 2,91 tras 6 horas. La viscosidad aparente también incrementó, alcanzando 25 483 cP al final del proceso. El índice de absorción de agua fue mayor en la primera hora (25,3 %), permaneciendo estable posteriormente. En contraste, la solubilidad aumentó progresivamente hasta alcanzar un 16,4 % a las 6 horas. El poder de hinchamiento del almidón acetilado superó al crudo, con un pico del 35,8 % a las 2 horas, manteniéndose constante después. Los resultados demuestran que la modificación del almidón de arracacha permite obtener propiedades tecnofuncionales específicas para aplicaciones alimentarias como la elaboración de sopas instantáneas, sustituto parcial en panificación y en la industria cárnica.

**Palabras clave:** acetilación, almidón modificado, *Arracacia xanthorrhiza*.

### Abstract

Revaluing Andean foods with high nutritional value is a pending task in the country. This is the case of arracacha, a root also known as the “Andean carrot,” which is rich in starch and easily digestible. The study evaluated the impact of acetylation time (0.5-6 hours) on arracacha starch (*Arracacia xanthorrhiza*) with acetic anhydride at 120°C on its physicochemical properties. The degree of substitution (DS) was observed to increase over time, reaching a maximum value of 2.91 after 6 hours. The apparent viscosity also increased, reaching 25,483 cP at the end of the process. The water absorption rate was highest in the first hour (25.3%), remaining stable thereafter. In contrast, solubility increased progressively, reaching 16.4% at 6 hours. The swelling power of acetylated starch exceeded that of raw starch, peaking at 35.8% after 2 hours and remaining constant thereafter. The results demonstrate that modifying arracacha starch provides specific technological and functional properties for food applications such as the production of instant soups, a partial substitute in baking, and in the meat industry.

**Keywords:** acetylation, modified starch, *Arracacia xanthorrhiza*.

**Recibido:** 18/02/2025

**Aceptado:** 11/06/2025

**Publicado:** 19/06/2025

**Sección:** Artículo Original

**\*Autor correspondiente:** [rvegas@unitru.edu.pe](mailto:rvegas@unitru.edu.pe)

### Introducción

La arracacha autóctona de las Américas, ha sido cultivada y consumida durante aproximadamente 3000 años por las comunidades locales. Una de las especies domesticadas más antiguas, su origen sigue siendo complejo, con los Andes peruanos como centro de diversificación. El cultivo abarca altitudes de 600 a 3600 m s.n.m., en regiones como Colombia, Brasil y Perú (Paredes et al., 2025).

El almidón es un polisacárido circunscrito en agregados semicristalinos, birrefringentes e insolubles en agua fría, proveniente de cereales y tubérculos con buen aporte energético (Arroyo et al., 2023). Esta macromolécula es empleada en la industria alimentaria como espesante, estabilizante o emulsificante; sin embargo, este polisacárido presenta limitaciones tecnofuncionales en su estado crudo, las cuales incluyen baja

capacidad de hinchamiento, capacidad de absorción, solubilidad, claridad del almidón y estabilidad a la congelación (Majzoobi & Farahnaky, 2021; Subroto et al., 2022).

Los reactivos utilizados principalmente para la acetilación de almidones son ácido acético, anhídrido acético, acetato de vinilo o una combinación (Kaushik et al., 2024). Se ha reportado que la modificación de la acetilación en almidón aumenta la capacidad de

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Trujillo, Filial Huamachuco, Perú. Grupo de Investigación y Transformación de Frutos de Cultivos Andinos (GITFCUA).

<sup>2</sup>Universidad Nacional Ciro Alegría, Huamachuco, Perú.

<sup>3</sup>Universidad Nacional de Trujillo, Escuela de Ingeniería Agronómica, Perú.

**Como citar:** Vegas Niño, R. M., Baltazar Flores, R. A., & Apolitano Urbina, C. M. (2025). Efecto del tiempo de acetilación en las características fisicoquímicas de almidón de *Arracacia xanthorrhiza*. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*. 27, e27702. <https://doi.org/10.18271/ria.2025.702>



hinchamiento, la claridad de la pasta de almidón y la estabilidad del almidón frente a la retrogradación (Gagneten et al., 2023; Liu et al., 2022). El almidón acetilado se aplica a menudo para mejorar la textura y la apariencia de productos cuya calidad puede disminuir debido a daños durante el procesamiento o la retrogradación. El almidón acetilado también puede proporcionar un buen efecto espesante en varios alimentos. Sin embargo, el almidón acetilado es inestable a los procesos térmicos caracterizados por una mayor viscosidad de descomposición (Eshag et al., 2022).

Materias primas como el almidón de quinua (Zakeri et al., 2025), maíz (Lagunes-Delgado et al., 2025), yuca y plátano (Araoye et al., 2023) y parota (Canto et al., 2024) han sido acetiladas para mejorar sus características fisicoquímicas.

Se ha considerado que el almidón de arracacha presenta una temperatura de gelatinización relativamente baja y una alta claridad de la pasta en comparación con otros almidones comerciales. Estas características pueden ser muy útiles para aplicaciones industriales. Sin embargo, el almidón crudo de arracacha presenta algunas desventajas que limitan su aplicación posterior, como un gel débil y una pasta de alta consistencia (Carvalho et al., 2020).

El objetivo general de esta investigación es evaluar el efecto del tiempo (0,5-6 h) de acetilación del almidón de arracacha variedad morada con anhídrido acético a 120 °C sobre el grado de sustitución, viscosidad aparente, índice de absorción, solubilidad y poder de hinchamiento en agua.

## Materiales y métodos

### Material

Constituida por tubérculos de arracacha variedad morada, proveniente del Distrito de Sanagoran (2670 msnm), provincia de Sánchez Carrión, Región La Libertad (Perú).

### Obtención de almidón de arracacha

Se realizó según metodología de Aristizábal et al. (2017), en la cual se seleccionó aquellas raíces libres de podredumbre y/o picadas por nemátodos. Se realizó un lavado con agua de la red pública para eliminar restos de tierra para posteriormente ser desinfectada en agua con hipoclorito de sodio a 100 ppm por 5 min seguido con un enjuague. Con un cuchillo manual se retiró la cáscara y su endocarpio procedió a un rallado cuya configuración estuvo por debajo de 5 mm de tamaño. Esta fue sometida a una mezcla con agua en una proporción

1:10 p/p para retirar restos de fibra expuestas en la fracción sobrenadante. El sedimento fue sometido a un proceso de lavado (3 veces) en proporción 1:10 p/p para eliminar material soluble como azúcares y pigmentos. La pasta húmeda fue secada en una estufa convectiva a 40 °C hasta peso constante. Posteriormente se trituro la muestra con un mortero para disminuir el tamaño de partícula y pasar por una criba (< 1mm) con el fin de uniformizar su granulometría.

### Acetilación del almidón

Se realizó según metodología de Mark y Mehlretter (1972), con ligeras modificaciones: 15 g de almidón (base seca) y se mezcló con 120 ml de anhídrido acético en un matraz de reacción con dos bocas. Se agitó a 200 rpm con un agitador por 5 min y se adicionó 1,65 g NaOH al 50 % (v/v).

La reacción de acetilación se llevó a cabo a 120 °C, y se tomó muestras a diferentes tiempos (variable independiente: 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 y 6 h) con el propósito de obtener un almidón acetilado con diferentes grados de sustitución. Al finalizar el tiempo establecido, se enfrió a 50 °C. Posteriormente, se adicionó 100 ml de alcohol etílico al 96 % (v/v) para detener la reacción. La solución resultante se centrifugó a 500 rpm por 15 min. Se lavó el residuo con etanol al 96 % (100 ml) y luego se lavó con agua destilada hasta eliminar la mayor parte de anhídrido acético. La pasta de almidón fue secada en estufa a 50 °C hasta peso constante. Luego se sometió a molienda para disminuir el tamaño de partícula y tamizada en una criba de 1 mm de luz de malla.

### Metodología experimental

Se realizó un diseño completamente aleatorizado con siete tratamientos (0.5-6 h) con tres repeticiones por cada uno de ellos. Mediante análisis de laboratorio listados en el apartado d.1 y d.2 se procedió a una caracterización fisicoquímica de los componentes del almidón crudo de arracacha, el cual constituyó la muestra testigo o blanco; así como la evaluación de las propiedades fisicoquímicas del almidón acetilado respectivamente.

### Caracterización fisicoquímica del almidón crudo de arracacha

- Humedad y sólidos totales (método 934.06, AOAC 1990).
- Cenizas (método 923.03, AOAC, 2002).
- Materia grasa (método 960.39, AOAC, 2002).
- Proteínas (método 960.52, AOAC, 2002).
- Tamaño de partícula (Sinko, 2011).

### ***Evaluación de las propiedades fisicoquímicas del almidón acetilado (variables dependientes)***

- Determinación de grupos acetilo ( $\text{CH}_3\text{-C=O}$ ) y grado de sustitución (GS) (Guerra et al., 2008).
- Determinación de la viscosidad aparente mediante viscosímetro rotacional a 25 °C (Carrascal, 2013).
- Determinación de índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua y poder de hinchamiento (Araujo et al., 2004).

### **Análisis estadístico**

Para determinar si existe diferencia significativa entre los diversos tiempos de acetilación sobre las variables dependientes se realizó un análisis de varianza (ANOVA). En tanto para saber la diferencia entre cada par de medias de los tratamientos se realizó el test de diferencia mínima significativa (DMS). Se realizaron tres repeticiones por tratamiento con un nivel de significancia ( $\alpha=0.05$ ).

### **Resultados**

En la Tabla 1 se muestra las características fisicoquímicas del almidón de arracacha variedad morada.

**Tabla 1.** Características fisicoquímicas del almidón de arracacha variedad morada.

| <b>Parámetros</b>                     | <b>Valores (<math>\pm</math> DE)</b> |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Rendimiento de almidón (%)            | 26,96 $\pm$ 0,81                     |
| Humedad (%)                           | 11,81 $\pm$ 0,02                     |
| Cenizas (%)                           | 1,25 $\pm$ 0,03                      |
| Grasa (%)                             | 0,01 $\pm$ 0,02                      |
| Proteína (%)                          | 0,35 $\pm$ 0,03                      |
| Carbohidratos (%)*                    | 86,58                                |
| Tamaño de partícula ( $\mu\text{m}$ ) | 24,94 $\pm$ 0,32                     |

DE: Desviación estándar, valores obtenidos de tres repeticiones.

\*Por diferencia

Los rendimientos de extracción de almidón se obtuvieron a partir de la raíz sin cáscara, el cual fue de 26,96  $\pm$  0,81 %. Este valor es cercano a los 24,8 % reportado como fracción de carbohidratos por Melchor & Tineo (2022) para la misma variedad. Se postula que el rendimiento de extracción de almidón está influenciado por la composición intrínseca de los componentes primarios del material vegetal, así como por el tamaño morfológico tanto de la raíz como de los gránulos de almidón; una mayor dimensión de estos últimos favorece dicho rendimiento (Contreras et al., 2022).

En la Tabla 1, el contenido de humedad (11,81  $\pm$  0,01 %) del almidón de arracacha variedad morada está por debajo de 18,08 % y 13,50 % de lo reportado Dini

et al. (2024) y Carranza et al. (2021) para la variedad amarilla respectivamente. Las cenizas en el almidón crudo de arracacha fueron de 1,25  $\pm$  0,02 %, valor superior al reportado por Dini et al. (2024) con un valor de 0.52 % en base seca.

En general las harinas a base de almidones tienen un bajo contenido en grasa. Los datos experimentales determinan una representación del 0,01  $\pm$  0,02 %. Parte del contenido graso se pierde en la etapa de precipitación en la extracción del almidón debido a una diferencia en densidad y solubilidad entre la fase acuosa y la apolar. El contenido proteico del almidón crudo de arracacha morada fue de 0,35  $\pm$  0,03 %; valor cercano a lo publicado por Pinzón et al. (2020). El bajo contenido proteico en la harina de almidón lo hace factible para la producción de jarabes, evitándose así las reacciones de Maillard, especialmente a altas temperaturas (Igartúa y Sceni, 2023). Los procesos de lixiviación que sufre el almidón en agua ayudan a arrastrar las proteínas debido al carácter hidrofílico de sus terminales (De Duarte et al., 2023).

En este trabajo experimental el tamaño de partícula del almidón de arracacha crudo fue de 24,94  $\mu\text{m}$ , valor superior a lo reportado para almidones de quinua y amaranto que son inferiores a 5  $\mu\text{m}$  (Ma et al., 2022) o a los del arroz de 3 a 10  $\mu\text{m}$  (Lapčíková et al., 2021).

En la Tabla 2 se muestra los resultados obtenidos del porcentaje de grupos acetilos, grado de sustitución y viscosidad aparente de almidón de arracacha a diferentes tiempos de acetilación. En ella se observa que conforme aumenta el tiempo de acetilación las demás variables tienden a aumentar. La acetilación durante la media hora de tratamiento no afecta significativamente en los porcentajes de grupos acetilos, el grado de sustitución y la viscosidad aparente en comparación al almidón crudo. Las diferencias más marcadas se observan a partir de las 2 horas de acetilación.

Estudios han demostrado que el grado de sustitución aumenta rápidamente en las etapas iniciales de la reacción y tiende a estabilizarse con el tiempo (Freitas et al., 2025). Además, investigaciones sobre la acetilación de pulpa de paja de trigo han evidenciado que, al aumentar el tiempo de reacción de 1 a 8 horas, el GS incrementa de 0.4 a 2.5, atribuido a una mejor difusión y adsorción del anhídrido acético en las moléculas de celulosa y hemicelulosa (Trejo et al., 2024).

El comportamiento directo del tiempo de acetilación con el aumento de los porcentajes de grupos acetilos y grado de sustitución, también se repite en diversos procesos de acetilación como el del almidón

de castaño (Liu et al., 2022), y plátano (Guerra et al., 2008). Se ha reportado que el grado de sustitución del almidón acetilado depende del tiempo de reacción, el

catalizador, la fuente vegetal y la cantidad de reactivo (de Souza et al., 2022).

**Tabla 2.** Porcentaje de grupos acetilos, grado de sustitución y viscosidad aparente de almidón de arracacha variedad morada a diferentes tiempos de acetilación.

| Tipo de almidón   | Tiempo de acetilación (h) | % grupos <sup>1</sup> acetilos | Grado de sustitución <sup>2</sup> (GS) | Viscosidad Aparente (cP)       |
|-------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Crudo</b>      | 0                         | 0,00 ± 0,00 <sup>a</sup>       | 0,00 ± 0,00 <sup>a</sup>               | 11261,0 ± 603,9 <sup>a</sup>   |
|                   | 0,5                       | 0,00 ± 0,00 <sup>a</sup>       | 0,00 ± 0,00 <sup>a</sup>               | 12045,6 ± 784,7 <sup>a</sup>   |
|                   | 1                         | 2,98 ± 0,05 <sup>b</sup>       | 0,12 ± 0,01 <sup>b</sup>               | 13783,0 ± 727,1 <sup>ab</sup>  |
| <b>Modificado</b> | 2                         | 5,67 ± 0,10 <sup>c</sup>       | 0,23 ± 0,01 <sup>c</sup>               | 16116,3 ± 600,8 <sup>b</sup>   |
|                   | 3                         | 16,56 ± 0,11 <sup>d</sup>      | 0,74 ± 0,01 <sup>d</sup>               | 19550,3 ± 1379,9 <sup>bc</sup> |
|                   | 4                         | 28,41 ± 0,05 <sup>e</sup>      | 1,48 ± 0,00 <sup>e</sup>               | 21611,0 ± 905,8 <sup>c</sup>   |
|                   | 5                         | 41,30 ± 0,46 <sup>f</sup>      | 2,61 ± 0,05 <sup>f</sup>               | 24149,6 ± 677,5 <sup>cd</sup>  |
|                   | 6                         | 44,14 ± 0,14 <sup>g</sup>      | 2,92 ± 0,02 <sup>g</sup>               | 25483,0 ± 1338,5 <sup>d</sup>  |

Las letras diferentes indican grupos estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ), valores obtenidos de tres repeticiones.

<sup>1</sup> masa de grupos acetilo incorporados por cada 100 g de almidón seco.

<sup>2</sup> número promedio de grupos acetilo sustituidos por unidad de anhidroglucosa (cada unidad puede tener un máximo de 3 sustituciones).

Eshag et al. (2022) establecen que los valores de GS oscilan entre 0,01 y 3, describiendo el número de grupos acetilo sustituidos en una unidad de glucosa. El acetato de almidón con DS 0,01 indica que hay un grupo acetilo sustituido en 100 unidades de glucosa. Por el contrario, el acetato de almidón con DS 3 indica que hay 300 grupos acetilo sustituidos en 100 unidades de glucosa. Esto se basa en la teoría de que las reacciones de acetilación pueden sustituir tres grupos hidroxilo libres de unidades de glucosa en los átomos C2, C3 y C6 con grupos acetilo.

El porcentaje de grupos acetilados máximo se obtuvo al mayor tiempo de reacción, el cual fue de 44,14 % correspondiéndole un grado de sustitución (GS) de 2,92. Cedeño et al. (2021), reportaron que el tiempo de reacción es significativo al momento de incorporar grupos acetatos en la molécula de almidón de banano variedad Cavendish AAA. Dependiendo del grado de sustitución, el almidón tiene diversas aplicaciones: de 0 a 0,2, se considera de grado alimenticio; de 0,2 a 1,5 sirve como sustituto del acetato de celulosa (Xu et al., 2004), y de 1,5 a 3 actúa como aditivo termoplástico utilizado en la producción de adhesivos para plásticos no reutilizables (Xu et al., 2005).

La modificación por acetilación puede conducir a un aumento en la capacidad de hidratación de los gránulos de almidón. Esto se debe a la desorganización de la estructura intragranular seguida de los siguientes eventos: (1) interrupción de los enlaces de hidrógeno intermoleculares del almidón y aumento de la penetración de agua en las regiones amorfas (Babic, 2007), (2) la presencia de fuerzas repulsivas que rechazan el almidón intermolecular debido a la sustitución de grupos acetilo, (3) la despolimerización parcial de la estructura de la amilopectina, que causa una disminución en el peso

molecular (PM) y (4) una disminución en la cristalinidad del almidón (Bello et al., 2010).

Con referencia a los valores de la tabla 2, el análisis de varianza (ANOVA) demuestra que hay diferencia significativa del porcentaje de grupos acetilos y el grado de sustitución para los diversos tiempos de acetilación. Asimismo, se estableció si existe diferencia mínima significativa (DMS) entre los diversos tratamientos de almidón modificado.

El grado de sustitución es bajo durante las dos primeras horas de reacción para posteriormente aumentar rápidamente. Xu et al. (2004) reportan que el grado de sustitución y la eficiencia de la reacción dependen del tiempo. Durante la acetilación de almidón de maíz; el grado de sustitución máximo fue de 2,7, obtenido a las 4 h. Para la arracacha variedad morada se obtuvo un GS de 1,48 - 2,64 entre las 4-5 h de reacción, intervalo de tiempo en que el almidón modificado cumple con la categoría de grado alimentario con un contenido máximo de acetilo de 2,5 g/100 g de la FDA; siendo empleado para productos horneados, enlatados y congelados; bebidas; confitería; alimentos para bebés; productos sin gluten y productos lácteos (Kaushik et al., 2024).

La viscosidad aparente aumenta con el tiempo de acetilación. Chavan et al. (2021) consideran que el almidón crudo tiene ciertas limitaciones a la hora de su aplicación a nivel industrial. Esto se debe a que los gránulos del almidón se hidratan, se hinchan y se rompen rápidamente generando cadenas cortas de amilosa y amilopectina teniendo por consiguiente una pérdida de su viscosidad.

En el proceso de acetilación se busca sustituir los grupos hidroxilos (-OH) ubicados en los carbonos C2,

C3 y C6 por grupos acetilados ( $\text{CH}_3\text{-C=O}$ ) el cual lo convierte en más viscoso (Marta et al., 2022). El análisis de varianza (ANOVA) indicó que existen diferencias significativas en los valores de viscosidad del almidón según el tiempo de reacción. La prueba de comparación múltiple (DMS) reveló que, hasta la primera hora de acetilación, no se presentan diferencias significativas en la viscosidad, incluyendo al almidón crudo. Por otro lado, los tiempos de acetilación correspondientes a la quinta y sexta hora muestran valores de viscosidad estadísticamente similares entre sí. La viscosidad aparente del almidón acetilado se ve influenciada por el grado de sustitución. Estudios han observado que la viscosidad de pastas de almidón acetilado aumenta con el GS, debido a la mayor capacidad de hinchamiento y la formación de estructuras más extensas en solución. Sin embargo, es importante destacar que un exceso en el grado de sustitución puede llevar a una disminución de

la viscosidad, ya que la introducción de grupos acetilo puede debilitar las interacciones entre las cadenas de almidón y reducir la capacidad de formar redes estructuradas (Zhang et al., 2023).

Según Prieto et al. (2010), los almidones acetilados se mezclan con más facilidad en agua. Esto quiere decir que el tiempo que dura el proceso de acetilación afecta bastante la consistencia del mismo; comportamiento observado cuando se acetila almidón de cebada, usando diferentes velocidades de agitación.

En la Tabla 3 se muestra los resultados obtenidos del índice de absorción en agua, índice de solubilidad y poder de hinchamiento de almidón de arracacha variedad morada a diferentes tiempos de acetilación. En ella se observa que conforme aumenta el tiempo de acetilación las demás variables tienden a aumentar.

**Tabla 3.** Índice de absorción en agua, índice de solubilidad y poder de hinchamiento de almidón de arracacha variedad morada a diferentes tiempos de acetilación.

| Tipo de almidón   | Tiempo de acetilación (h) | Índice en absorción en agua (g gel/ g muestra) | Índice de solubilidad en agua (%) | Poder de hinchamiento (%)  |
|-------------------|---------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| <b>Crudo</b>      | 0                         | 12,44 ± 0,28 <sup>a</sup>                      | 3,13 ± 0,10 <sup>a</sup>          | 11,39 ± 0,24 <sup>f</sup>  |
|                   | 0,5                       | 19,40 ± 0,20 <sup>b</sup>                      | 5,05 ± 0,09 <sup>b</sup>          | 21,24 ± 0,16 <sup>e</sup>  |
|                   | 1                         | 25,30 ± 0,14 <sup>c</sup>                      | 7,28 ± 0,12 <sup>c</sup>          | 29,82 ± 0,19 <sup>d</sup>  |
|                   | 2                         | 24,60 ± 0,16 <sup>de</sup>                     | 8,06 ± 0,05 <sup>d</sup>          | 35,81 ± 0,20 <sup>a</sup>  |
| <b>Modificado</b> | 3                         | 23,29 ± 0,12 <sup>c</sup>                      | 10,57 ± 0,05 <sup>e</sup>         | 34,38 ± 0,23 <sup>ab</sup> |
|                   | 4                         | 24,06 ± 0,08 <sup>cd</sup>                     | 12,68 ± 0,16 <sup>f</sup>         | 33,93 ± 0,07 <sup>b</sup>  |
|                   | 5                         | 23,24 ± 0,11 <sup>c</sup>                      | 14,78 ± 0,10 <sup>g</sup>         | 33,57 ± 0,06 <sup>bc</sup> |
|                   | 6                         | 22,36 ± 0,16 <sup>b</sup>                      | 16,40 ± 0,15 <sup>h</sup>         | 32,40 ± 2,03 <sup>c</sup>  |

Las letras diferentes indican grupos estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ). Valores obtenidos de tres repeticiones.

El índice de absorción de agua es la cantidad de agua retenida por el almidón. En la Tabla 3 se muestra los resultados obtenidos del índice de absorción de agua (g gel/g muestra) de almidón de arracacha. La esterificación del almidón implica la conversión de los tres grupos hidroxilo disponibles en derivados de alquilo o arilo. Este tipo de modificación puede reducir las propiedades de retrogradación del almidón y la temperatura de gelatinización y mejorar la hinchazón, la absorción de agua y la solubilidad del almidón al reducir las interacciones moleculares del almidón (Wang et al., 2022). Por otro lado, Marin et al. (2024) consideran que los gránulos de almidón exhiben microgrietas y fracturas superficiales, lo cual podría favorecer una mayor capacidad de retención hídrica en su estructura matricial.

Los resultados demuestran que al margen del tiempo de acetilación hay un aumento del índice de absorción de agua, llegando su valor máximo a una hora de acetilación (25,30 ± 0,14 g gel/ g muestra) para posteriormente mantenerse en la segunda hora y tener luego un pequeño decaimiento. Este fenómeno podría explicarse a que los grupos acetilo rompen parcialmente

las fuerzas de enlace por puente de hidrógeno entre las cadenas del almidón, aumentando la hidrofobicidad local pero también abriendo la estructura del gránulo facilitando la entrada de agua a regiones amorfas del almidón (Zhang et al., 2023; Subroto et al., 2023). Pasado el tiempo, el número de sitios accesible para la acetilación empiezan a saturarse para finalmente exista una reabsorción molecular o retrogradación, donde las cadenas de amilosa y amilopectina se reordenan y compactan (Chakraborty et al., 2022). Por otro lado, autores como Guo et al. (2023) consideran que el índice de absorción e índice de solubilidad en agua del almidón además están relacionadas con el tamaño de sus gránulos. Comparativamente el almidón de arracacha acetilado tiene un índice de absorción de agua superior al de almidón de yuca crudo que varía entre 0,82 y 15,52 g gel/g dependiendo de la variedad y estado de madurez fisiológica (Aristizábal et al., 2017).

En la Tabla 3 se observa que conforme aumenta el tiempo de acetilación se incrementa la solubilidad de los almidones. La adición de un grupo acetilo al almidón rompe el enlace de hidrógeno entre el almidón

y el agua, cambia su estructura interna y aumenta su solubilidad (Zhang et al., 2023). La acetilación conduce a la degradación de las estructuras del almidón y al debilitamiento de las interacciones entre las moléculas de almidón, lo que resulta en la desorganización de su estructura a diversos fragmentos; por tanto, la introducción de grupos acetilo retrasa el comportamiento de auto-reensamblaje del almidón, lo que lleva a una mayor solubilidad (Chengdeng et al., 2023). También se ha considerado que la disminución de la solubilidad del almidón se debe a una menor lixiviación de amilosa, lo que puede atribuirse a interacciones más fuertes entre las moléculas de amilosa y amilopectina, que impiden la lixiviación de amilosa de los gránulos (Kusumaningsih et al., 2023).

Por otra parte, Carrascal (2013) establece que un mayor grado de acetilación genera apertura de la estructura del almidón de arracacha haciéndola más accesible al agua, contradiciendo un poco aquello de que la solubilidad está dada por la cantidad de amilosa presente en el almidón. De la tabla 3 se demuestra que existe una marcada diferencia del índice de solubilidad en todos los tratamientos.

El índice de solubilidad en agua del almidón de arracacha acetilado a condiciones de grado alimentario (GS=2,5) es aproximadamente el 13 %, valor cercano al 12,32 % correspondiente al almidón de yuca crudo. Se establece de esta manera que almidones de buena calidad con alto contenido de almidón y alta viscosidad de la pasta, tendrán una baja solubilidad, alta absorción de agua y un alto poder de hinchamiento (Aristizábal et al., 2017). Es importante precisar que a las 3-4 horas de reacción estos polímeros alcanzan un índice de solubilidad de 12-14 % respectivamente; valores cercanos a lo publicado por Chen et al. (2023) con 12,8 % para el almidón de trigo acetilado con anhídrido maleico.

Jia et al. (2023) consideran que el poder de hinchamiento del almidón se atribuye mayoritariamente a la amilopectina; y que las cadenas cortas de amilosa interactúan fácilmente con las cadenas de amilopectina para inhibir la hinchazón del almidón. Cedeño et al. (2023) establecen que la introducción de grupos acetilo en el almidón de maíz disminuye la formación de enlaces de hidrógeno intermoleculares entre las cadenas de almidón, lo que debilita la estructura granular. Esto facilita la entrada de agua en los gránulos, aumentando su capacidad de hinchamiento.

En la Tabla 3 se muestra los resultados obtenidos del efecto del tiempo de acetilación sobre el poder de hinchamiento (%) de almidón de arracacha variedad morada. Se observa que el poder de hinchamiento se incrementa con el tiempo de acetilación hasta las

dos horas aproximadamente logrando en adelante una estabilización. El valor máximo alcanzado es del 35,81 %, valor tres veces superior a su correspondiente almidón crudo de arracacha, así como el de almidón de yuca (15,45 %), estableciéndose de esta manera que almidones con alto contenido de almidón y alta viscosidad de la pasta, tendrán una baja solubilidad, alta absorción de agua y un alto poder de hinchamiento (Aristizábal et al., 2017).

La integridad de los gránulos hinchados desempeña un papel crucial en la formación de geles fuertes cuando los gránulos de almidón crudo con contenido de amilosa ordinario se calientan en agua (Wang et al., 2022). La hinchazón del almidón se considera beneficiosa en el procesamiento de alimentos porque el aumento de la viscosidad lo convierte en un agente espesante (Navaf et al., 2021).

La solubilidad y el poder de hinchamiento se ven afectados por varios factores, incluido el complejo amilosa-lípido, el peso molecular, el tamaño del gránulo, la relación amilosa/amilopectina, la distribución de las longitudes de las cadenas de amilopectina, las interacciones de las cadenas de amilosa-amilopectina, la estructura molecular de los gránulos de almidón y la disposición de los cristales (Sondari et al., 2021). Ante esto Guerrero et al. (2024) reportan un contenido de amilosa del 16,6 – 30,4 % y de 69,6 – 83,3 % para la amilopectina para dos ecotipos de arracacha.

## Conclusión

Un aumento del tiempo de acetilación acrecentó el grado de sustitución de almidón de arracacha variedad morada alcanzado su valor máximo para el uso en la industria alimentaria entre las 4,5-5 horas, con un grado de sustitución cercano a 2,5. Asimismo, hubo un incremento de la viscosidad aparente llegando a 25483.00 cP a las seis horas de reacción. Un aumento del tiempo de acetilación aumentó el índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua y poder de hinchamiento del almidón de arracacha variedad morada obteniendo valores máximos en los tiempos de 1 h, 6 h y 2 h con valores máximos 25,3 %, 16,4 % y 35,8 % respectivamente.

La acetilación de almidón de arracacha con anhídrido acético indujo cambios favorables en las propiedades fisicoquímicas de este polisacárido, convirtiéndola más hidrofílica, el cual podría ser utilizado como aditivo alimentario especialmente en sopas instantáneas y productos congelados. Así como tener una aplicabilidad como película protectora en el recubrimiento de frutas o como material biodegradable en envases.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Trujillo-Filial Huamachuco por las instalaciones brindadas para llevar a cabo el trabajo experimental.

## Contribución de los autores

*Recursos, Investigación*, Vegas Niño, R. M., Baltazar Flores, R. A. *Conceptualización, Escritura - borrador original*, Vegas Niño, R. M., *Análisis formal, Software, Validación*, Apolitano Urbina, C. M.

## Referencias

- AOAC. (1990). Official Methods of Analysis (fifteen), Association of Official Analytical Chemists, II, The Association, Arlington, VA (1990)
- AOAC. (2002). Official Methods of Analysis (seventeen), Association of Official Analytical Chemists, II, The Association, Arlington, VA (2002)
- Araujo, C., Rincón, A., & Padilla, F. (2004). Caracterización del almidón nativo de *Dioscorea bulbifera* L. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 54, 2, 241-245. [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0004-06222004000200016](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222004000200016)
- Araoye, K. T., Otolowo, D. T., Oludahunsi, O. F., & Oluwamukomi, M. O. (2023). Chemical, microbial and sensory qualities of ice cream stabilised with acetylated starches extracted from cassava and plantain. *FUOYE Journal of Agriculture and Human Ecology*, 7(1), 1-8. <https://doi.org/10.62923/fuojahe.v7i1.212>
- Aristizábal, J., Sánchez, T., & Mejía D. (2017). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO 163, Roma. <https://www.fao.org/4/a1028s/a1028s.pdf>
- Arroyo-Dagobeth, E.D., Figueroa-Florez, J.A., Cadena-Chamorro, E., Rodriguez-Sandoval, E., Salcedo-Mendoza, J.G., & Cervera-Ricardo, M.A. (2023). Structural, physicochemical, and pasting properties of native cassava (*Manihot esculenta*) and yam (*Dioscorea alata*) starch blends. *Agronomía Colombiana*, 41(3), 1-12. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/110111/91110>
- Babic, J., Subaric, D., Ackar, D., Kovacevic, D., Pilizota, V., & Kopjar, M. (2007). Preparation and characterization of acetylated tapioca starches. *Deutsche Lebensmittel-rundschau*, 103, 580–585. [https://www.researchgate.net/profile/Jurislav-Babic-2/publication/279710937\\_Preparation\\_and\\_characterization\\_of\\_acetylated\\_tapioca\\_starches/links/55f1604608ae0af8ee1d5cbb/Preparation-and-characterization-of-acetylated-tapioca-starches.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jurislav-Babic-2/publication/279710937_Preparation_and_characterization_of_acetylated_tapioca_starches/links/55f1604608ae0af8ee1d5cbb/Preparation-and-characterization-of-acetylated-tapioca-starches.pdf)
- Bello-Pérez, L.A., Agama-Acevedo, E., Zamudio-Flores, P.B., Mendez-Montealvo, G., & Rodríguez-Ambríz, S.L. (2010). Effect of low and high acetylation degree in the morphological, physicochemical and structural characteristics of barley starch. *Food Science & Technology*, 43, 1434–1440. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.04.003>
- Canto-Pinto, J. C., Pérez-Pacheco, E., Ríos-Soberanis, C. R., Ortiz-Fernández, A., Estrada-León, R. J., Moo-Huchin, V. M., & Pérez-Padilla, Y. (2024). Effects of acetylation on the morphological, physicochemical, and thermal properties of *Enterolobium cyclocarpum* starch. *Chemistry Select*, 9(41), e202402235. <https://doi.org/10.1002/slct.202402235>
- Carranza-Saavedra, D., Alvarado-Núñez, J. A., Solanilla-Duque, J. F., & Valenzuela-Real, C. P. (2021). Study of carbohydrate hydrolysis from arracacha roots (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft) to produce fermentable sugars. *Ingeniería e Investigación*, 41(2), e105. Epub June 17. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v41n2.87365>
- Carrascal, J. (2013). *Acetilación del almidón de arracacha (Arracacia xanthorrhiza) y evaluación de su aplicación como posible auxiliar farmacéutico* [Tesis de posgrado, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/21181>
- Carvalho, D., Villar, J., Castanha, N., Chieragato, B., Matta, M., & Duarte, P. (2020). Ozonemodification of arracacha starch: Effect on structure and functional properties. *Food Hydrocolloids*, 108, 106066. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106066>
- Cedeño Sares, L. A., Arias-Toro, D., Pereira Guanuche, F. A., & León Cueva, W. P. (2023). Efecto de la acetilación en el almidón de maíz. *Magazine de las Ciencias: Revista de Investigación e Innovación*, 8(4), 109–121. <https://doi.org/10.33262/rmc.v8i4.2965>
- Cedeño-Sares, L., Díaz-Torres, R., Casariego-Año, A., Arias-Toro, D., & Yáñez-Romero, M. (2021). El Efecto de la acetilación sobre propiedades físicas del almidón de Banano (*M. Sapientum* L.)

- variedad Cavendish. *Cumbres*, 7(1), 9-20. <https://doi.org/10.48190/cumbres.v7n1a1>
- Chakraborty, I., Pooja, N., Mal, S.S., Uttam, P., Rahman, H., & Mazumder, N. (2022). An insight into the gelatinization properties influencing the modified starches used in food industry: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 15, 1195–1223. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02761-z>
- Chavan, P., Sinhmar, A., Nehra, M., Thory, R., Pathera, A. K., Sundarraj, A. A., & Nain, V. (2021). Impact on various properties of native starch after synthesis of starch nanoparticles: A review. *Food Chemistry*, 364, 130416. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130416>
- Chen, H., Fu, M., Zhang, Y., Ma, C., & Kan, J. (2023). Effect of temperature during acetylation and heat moisture treatment on the structural and physicochemical properties and application of wheat starch. *Food Hydrocolloids*, 144, 109036. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109036>
- Chengdeng, C., Suyang, L., Yiqing, Z., Bilian, C., Yongjin, H., Mingmin, Z., Yingting, Z., & Hongwei, W. (2023). Preparation, multi-scale structures, and functionalities of acetylated starch: An updated review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 249, 126142. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126142>
- Contreras-Santos, J. L., Villamil-Carvajal, J. E., Garnica-Montaña, J. P., & Atencio-Solano, L. M. (2022). Evaluación de los componentes químicos del suelo en el sistema productivo de arracacha en Cajamarca, Colombia. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(7), 1171-1182. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i7.3072>
- De Duarte, A., Díaz, F., & Mejía, L. (2023). Práctica de operaciones unitarias en ingeniería de alimentos. Editorial Universidad de Caldas. Primera Edición.
- de Souza Silva, G.M., de Carvalho Batista Muniz, I., Veloso, C.M., Santos, L.S., de Melo Neto, B.A., & Bonomo, R.C.F. (2022). Chemical, morphological, thermal and technological properties of acetylated white inhambu starch. *Journal of Polymers and the Environment*, 30, 246–257. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02190-7>
- Dini, C., Garzón, R., & Rosell, C. M. (2024). Breadmaking potential of andean roots and tuber starches from ahípa (*Pachyrhizus ahípa*), oca (*Oxalis tuberosa*), and arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*). *Starch-Stärke*, 2400085. <https://doi.org/10.1002/star.202400085>
- Eshag, M. F., Mohamed, A. A., Ahmed, I. A. M., Alamri, M. S., Al Juhaimi, F. Y., Hussain, S., Ibraheem, M. A., & Qasem, A. A. (2022). Acetylated corn starch as a fat replacer: Effect on physicochemical, textural, and sensory attributes of beef patties during frozen storage. *Food Chemistry*, 388, 132988. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132988>
- Freitas, R., Carmo, K., Pádua, F., & Botaro, V. (2025). Kinetics, thermodynamics and structure: an analysis of corn starch acetylation. *Materials Research*, 28:e20240333. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2024-0333>
- Gagnetten, M., Cáceres, S.G., Rodríguez Osuna, I.A., Olaiz, N.M., Schebor, C., & Leiva, G.E. (2023). Modification of cassava starch by acetylation and pulsed electric field technology: Analysis of physical and functional properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 85, 103344. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103344>
- Guerra, D., Bello, A., González, R., Solorza, J., & Arámbula, G. (2008). Efecto del tiempo de reacción en la acetilación de almidón de plátano. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 7(3), 283-291. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-27382008000300013](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382008000300013)
- Guerrero, V., Villacrés, E., & Morales, M. (2024). Sustitución parcial de harina de trigo por almidón modificado de zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza*) en la elaboración de noodles bajo en gluten. *Agroindustrial Science*, 14, (1), 55-61. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2024.01.06>
- Guo, L., Chen, H., Zhang, Y., Yan, S., Chen, X., & Gao, X. (2023). Starch granules and their size distribution in wheat: Biosynthesis, physicochemical properties and their effect on flour-based food systems. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 21, 4172-4186. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2023.08.019>
- Igartúa, D., & Sceni, P. (2023). Abordaje experimental para la enseñanza y el aprendizaje de la reacción de Maillard en química de los alimentos. *Educación Química*, 34, 9, 2-14. <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.4.86124e>
- Jia, R., Cui, C., Gao, L., Qin, Y., Ji, N., Dai, L., Wang, Y., Xiong, L., Shi, R., & Sun, Q. (2023). A review of starch swelling behavior: Its mechanism,

- determination methods, influencing factors, and influence on food quality. *Carbohydrate Polymers*, 321, 121260. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121260>
- Kaushik, R., Kumar, A., Rani, N., Phogat, R., & Gehlot, R. (2024). Acetylation/esterification of starch. In *Starch* (1.<sup>a</sup> ed., pp. 33). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781032655598>
- Kusumaningsih, T., Firdaus, M., Handayani, D., Istiqomah, F., & Muhammad, F. (2023). Effect of acetylation treatment on the physicochemical and morphological properties of three sweet potato starches (*Ipomoea batatas*). *Biodiversitas* 24, 5, 3038-3044 <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240559>
- Lagunes-Delgado, C., Agama-Acevedo, E., Bello-Pérez, L. A., & Gutiérrez, T. J. (2025). Reactively extruded corn starch foams via organocatalytic acetylation: Effect of l(+)-tartaric acid as an organocatalyst on the molecular, structural, and digestibility characteristics of starch. *Food Hydrocolloids*, 162, 111029. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.111029>
- Lapčíková, B., Lapčík, L., Valenta, T., Majar, P., & Ondroušková, K. (2021). Effect of the rice flour particle size and variety type on water holding capacity and water diffusivity in aqueous dispersions. *Food Science and Technology*, 142, 111082. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111082>
- Liu, C., Yan, H., Liu, S., & Chang, X. (2022). Influence of phosphorylation and acetylation on structural, physicochemical and functional properties of chestnut starch. *Polymers*, 14(1), 172. <https://doi.org/10.3390/polym14010172>
- Ma, M., Zhu, H., Liu, Z., Sui, Z., & Corke, H. (2022). Removal of starch granule-associated proteins alters the physicochemical properties of diverse small granule starches. *Food Hydrocolloids*, 124(Part B), 107318. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107318>
- Majzoobi, M., & Farahnaky, A. (2021). Granular cold-water swelling starch; properties, preparation and applications, a review. *Food Hydrocoll*, 111, 106393. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106393>
- Marin, K., Campuzano, A., Figueroa, A., & Cáceres, J. (2024). Flour carrot (*Arracacia xanthorrhiza*). *Third Student Congress on Food Science Agriculture and Environment*. <https://www.uagraría.edu.ec/documentos/2022/Third-Student-Congress-on-Food-Science.pdf#page=29>
- Mark, A., & Mehltretter, C. (1972). Facile preparation of starch triacetates: *Starch/Starke*, 24, 73-76. <https://doi.org/10.1002/star.19720240302>
- Marta, H., Cahyana, Y., Djali, M., & Pramafisi, G. (2022). The properties, modification, and application of banana starch. *Polymers*, 14(15), 3092. <https://doi.org/10.3390/polym14153092>
- Melchor, Y. & Tineo, Y. (2022). *Caracterización de tres ecotipos de arracacha (Arracacia xanthorrhiza Bancroft) con fines agroindustriales en condiciones agroclimáticas de la comunidad de Mayobamba - Chinchao 2019* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Hermilio Valdizan, Perú]. <https://repositorio.unheval.edu.pe/item/5976c74a-590b-402f-817f-bb6f74213814>
- Navaf, M., Sunooj, K. V., Krishna, N. U., Aaliya, B., Sudheesh, C., Akhila, P. P., Sabu, S., Sasidharan, S., Ahmad, S., & George, J. (2021). Effect of different hydrothermal treatments on pasting, textural, and rheological properties of single and dual modified *Corypha umbraculifera* L. starch. *Starch - Starke*, 74, 3–4. <https://doi.org/10.1002/star.202100236>
- Paredes-Andrade, N. J., Blas-Sevillano, R. H., & Sørensen, M. (2025). Traditional uses, processes, and markets: The case of arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft). En M. P. Cereda & O. F. Vilpoux (Eds.), *Underground Starchy Crops of South American Origin: Traditional Starch Food Products* (Vol. 4, pp. 325–332). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90844-3.00020-2>
- Pinzón, M. I., Sanchez, L. T., & Villa, C. C. (2020). Chemical, structural, and thermal characterization of starches from four yellow arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) roots produced in Colombia. *Heliyon*, 6(8), e04763. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04763>
- Prieto, J., Trejo, C., Prieto, F., Méndez, M., Bello, L., & Román, A. (2010). Acetilación y caracterización del almidón de cebada. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 6(1), 32-43. <https://revista.itson.edu.mx/index.php/rln/article/view/181>
- Sinko, P. (2011). *Martin's Physical Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*. 6ed. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins. [https://www.google.com.pe/books/edition/Martin\\_s\\_Physical\\_Pharmacy](https://www.google.com.pe/books/edition/Martin_s_Physical_Pharmacy)

[and Pharmaceu/4wytEAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=Martin%27s+Physical+Pharmacy+and+Pharmaceutical+Sciences+6+ed.+Baltimore&pg=PT534&printsec=frontcover](#)

- Sondari, D., Amanda, P., Suryaningrum, R., Burhani, D., Pramasari, D.A., Septevani, A.A., Restu, W.K., Agustian, E., Irawan, Y., & Oktaviani, M. (2021). Effect of different amount of cross-linker and catalyst on modified cassava towards its chemical characteristic. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 759, 12007. doi:10.1088/1755-1315/759/1/012007
- Subroto, E., Sitha, N., Filianty, F., Indiarito, R., & Sukri, N. (2022). Freeze moisture treatment and ozonation of adlay starch (*Coix lacryma-Jobi*): Effect on functional, pasting, and physicochemical properties. *Polymers*, 14(18),3854. <https://doi.org/10.3390/polym14183854>
- Subroto, E., Cahyana, Y., Indiarito, R., & Rahmah, T. A. (2023). Modification of starches and flours by acetylation and its dual modifications: A review of impact on physicochemical properties and their applications. *Polymers*, 15(14), 2990. <https://doi.org/10.3390/polym15142990>
- Trejo-Cáceres, M., Sánchez, M.C., & Martín-Alfonso, J.E. (2024). Assessment of the acetylation process of wheat straw pulp as sustainable rheological modifier for non-polar fluids. *Cellulose*, 31, 2063–2078. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-05750-x>
- Wang, Z., Mhaske, P., Farahnaky, A., Kasapis, S., & Majzoobi, M. (2022). Cassava starch: Chemical modification and its impact on functional properties and digestibility, a review. *Food Hydrocolloids*, 129, 107542. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107542>.
- Xu, Y. X., Dzenis, Y., & Hanna, M. A. (2005). Water solubility, thermal characteristics and biodegradability of extruded starch acetate foams. *Industrial Crops and Products*, 21(3), 361–368. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.05.004>
- Xu, Y.X., Miladinov, V., & Hanna, M.A. (2004). Synthesis and characterization of starch acetates with high substitution. *Cereal Chemistry*, 81, 735-740. <http://dx.doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.6.735>
- Wang, H., Wang, Y., Xu, K., Zhang, Y., Shi, M., Liu, X., & Zhang, H. (2022). Causal relations among starch hierarchical structure and physicochemical characteristics after repeated freezing-thawing. *Food Hydrocolloids*, 122, 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107121>
- Zakeri, S. M., Alimi, M., Shokoohi, S., & Shahidi, S.A. (2025). Acetylated distarch adipate quinoa starch in tomato ketchup: Modification process and functional characteristics. *Applied Food Research*, 5(1), 100708. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100708>
- Zhang, C., Du, M., Cao, T., & Xu, W. (2023). The effect of acetylation on the physicochemical properties of chickpea starch. *Foods*, 12(13), 2462. <https://doi.org/10.3390/foods12132462>