

Agricultural applications of starch nanoparticles: A scoping review

Bryam Joao Gardella Caceres¹; María de los Ángeles Pareja Achahui¹; Paulo César Poma de la Cruz¹; Angela Jimena Yactayo Audante¹; Giovanna Madeleyne Martínez Molina¹; Sol Rodríguez Carrillo¹

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Lima, Perú, N00306312@upn.pe, N00290985@upn.pe, N00179583@upn.pe, N00305108@upn.pe, giovanna.martinez@upn.edu.pe, sol.rodriguez@upn.edu.pe

Abstract– *In the highland regions, agriculture faces challenges due to factors such as irregular rainfall, temperature fluctuations, and soil erosion, which negatively impact the efficiency of conventionally applied fertilizers and pesticides. This study aims to explore the use of starch nanoparticles (SNPs) as an innovative solution in agriculture, specifically to improve the controlled release of nutrients and pesticides and reduce the ecological impact of inputs. A systematic review was conducted using the PRISMA methodology, where 226 articles were identified, and 9 studies were selected according to inclusion and exclusion criteria. The chosen studies belong to Q1 journals with an impact factor greater than 4.5, demonstrating that this area of knowledge is relevant to the scientific community. From the analysis of the studies, the most reported method for nanoparticle fabrication was nanoprecipitation, which allows obtaining SNPs with controlled sizes that enable the encapsulation of bioactive substances. Among the relevant findings, it was highlighted that SNPs not only improve the efficiency in the release of active compounds such as fatty acids, urea, and phenolic compounds, but also provide greater stability and reduce volatilization. In conclusion, SNPs offer great potential to optimize the use of agricultural resources, providing an ecological and effective alternative for improved dosing of fertilizers and pesticides, which contributes to sustainability and enhances agricultural performance in fragile areas.*

Keywords– starch, nanoparticles, pesticides, fertilizers.

Aplicaciones agrícolas de las nanopartículas de almidón: una revisión del alcance

Bryam Joao Gardella Caceres¹✉; María de los Ángeles Pareja Achahui¹✉; Paulo César Poma de la Cruz¹✉; Angela Jimena Yactayo Audante¹✉; Giovanna Madeleyne Martínez Molina¹✉; Sol Rodríguez Carrillo^{1*}✉

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Lima, Perú, N00306312@upn.pe, N00290985@upn.pe, N00179583@upn.pe, N00305108@upn.pe, giovanna.martinez@upn.edu.pe, sol.rodriguez@upn.edu.pe*

Resumen— En las regiones altoandinas, la agricultura enfrenta desafíos debido a factores como la irregularidad de las precipitaciones, las fluctuaciones térmicas y la erosión de los suelos, lo que impacta negativamente en la eficiencia de los fertilizantes y pesticidas aplicados de manera convencional. Este estudio tiene como objetivo explorar el uso de nanopartículas de almidón (SNPs) como una solución innovadora en la agricultura, específicamente para mejorar la liberación controlada de nutrientes y pesticidas, y reducir el impacto ecológico de los insumos. Se realizó una revisión sistemática realizando la metodología PRISMA, donde se identificaron 226 artículos, seleccionando 9 estudios de acuerdo con los criterios de inclusión y exclusión. Los estudios elegidos pertenecen a revistas Q1 con un factor de impacto mayor a 4.5, demostrando que esta área de conocimiento es relevante para la comunidad científica. Del análisis de estudios, el método más reportado para la elaboración de nanopartículas fue la nanoprecipitación, con la cual se pueden obtener SNPs con tamaños controlados que permiten encapsular sustancias bioactivas. Entre los resultados relevantes, se destacó que las SNPs no solo mejoran la eficiencia en la liberación de compuestos activos como ácidos grasos, urea y compuestos fenólicos, sino que también permiten una mayor estabilidad y reducción de la volatilización. En conclusión, las SNPs ofrecen un gran potencial para optimizar el uso de recursos agrícolas, proporcionando una alternativa ecológica y eficaz para la dosificación mejorada de fertilizantes y pesticidas, lo que contribuye a la sostenibilidad y mejora el rendimiento agrícola en zonas frágiles.

Palabras clave— almidón, nanopartículas, pesticidas, fertilizantes.

I. INTRODUCCIÓN

En las regiones altoandinas, la agricultura se desarrolla en medio de condiciones climáticas sumamente desafiantes, marcadas por una amplia oscilación térmica entre el día y la noche, precipitaciones irregulares y, con frecuencia, prolongados periodos de sequía [1]. Estas fluctuaciones se ven intensificadas por la topografía abrupta, en la que los suelos con elevada pendiente son susceptibles a la erosión y al arrastre de sedimentos. La combinación de estos factores climáticos y geográficos propicia la pérdida de fertilizantes y pesticidas cuando se aplican de manera tradicional [2], pues una parte considerable de los insumos se pierde” a través de la escorrentía o se volatiliza antes de que los cultivos logren asimilarlos, mientras que otra parte puede carecer de selectividad e involucra un impacto nocivo a otros organismos [3]. Este fenómeno repercute en la disminución de la eficiencia agrícola y en la degradación de los recursos naturales, ya que la acumulación de residuos químicos puede contaminar tanto los suelos como las reservas de agua

superficiales y subterráneas [4]. Además, la naturaleza fragmentada de las parcelas de cultivo y la escasa infraestructura de riego hacen que la adopción de sistemas intensivos sea complicada, siendo necesaria la implementación de estrategias innovadoras que incrementen la disponibilidad de nutrientes y reduzcan el impacto ecológico.

Perú es uno de los países con mayor diversidad agrícola de América Latina, destacando por su amplio rango de cultivos nativos como la papa (*Solanum tuberosum*), la cual ha sido un alimento básico y un recurso culturalmente significativo para las poblaciones andinas desde hace miles de años [5]. Este tubérculo, que según estimaciones oficiales aporta cerca del 4% del Producto Bruto Interno (PBI) agrícola del país, cuenta con un amplio bagaje genético que ha registrado cerca de 4 mil variedades locales [6], [7]. Otros recursos importantes en este país son los granos (quinua, tarwi), raíces (yuca), frutos y algas. Sin embargo, solo una proporción limitada de estos productos ha incorporado a la producción con valor agregado, con lo que se desperdicia el potencial de muchas variedades cuyas propiedades fisicoquímicas únicas podrían aplicarse en distintos sectores industriales [8], [9]. Uno de los componentes más relevantes es el almidón, un biopolímero renovable, biodegradable y no tóxico, que actúa como principal reserva energética en las plantas. Incluso, al día de hoy, el almidón puede emplearse en la fabricación de envases biodegradables, el desarrollo de alimentos funcionales e incluso en formulaciones farmacéuticas, entre otros [3], [4].

En los últimos años, ha cobrado especial interés el desarrollo de nanomateriales basados en almidón. Para estos procesos, se someten las macromoléculas de almidón a métodos como la hidrólisis controlada, la gelatinización-retrogradación o la precipitación en medio acuoso, con el fin de obtener nanopartículas de almidón (SNPs) [10], [11]. Estas partículas suelen presentar tamaños que van desde algunas decenas hasta unos cientos de nanómetros, lo cual confiere a los materiales resultantes propiedades físicas y químicas notoriamente distintas en comparación sus contrapartes en estado natural. Entre dichas propiedades destacan la relación superficie-volumen (muy elevada), la posibilidad de encapsular compuestos activos y la biodegradabilidad, lo que suscita un gran interés para múltiples aplicaciones. Si bien en un principio las SNPs se investigaron con fines biomédicos — por ejemplo, en la elaboración de sistemas de liberación controlada de fármacos [12]—, se ha observado un enorme potencial para su uso en la formulación de fertilizantes y pesticidas de liberación progresiva [13], [14]. Este último

campo resulta de especial relevancia para regiones frágiles como los Andes, donde la protección de los ecosistemas y el uso eficiente de los recursos constituyen metas prioritarias.

El empleo de las SNPs en el sector agrícola podría representar una alternativa en el sector gracias a la capacidad de encapsular sustancias bioactivas y dosificar diferentes nutrientes y fitosanitarios. A través de este mecanismo, los insumos se protegen frente a la volatilización y la degradación prematura, liberándose de manera controlada en el suelo. Dicho enfoque redundaría en mayor eficiencia de absorción por parte de las plantas, al mantener la disponibilidad de los nutrientes a lo largo de un periodo más prolongado y en concentraciones ajustadas a sus requerimientos. Además, al tratarse de un material biodegradable, el recubrimiento basado en almidón se descompone de forma natural sin dejar residuos tóxicos, lo que contribuye a la sostenibilidad de la actividad agropecuaria [10], [13]. Estos beneficios adquieren mayor importancia en las zonas altoandinas, donde la escasez de materia orgánica y la acentuada pendiente del terreno favorecen la erosión y el agotamiento de nutrientes. En tales condiciones, la liberación controlada puede marcar la diferencia entre una cosecha exitosa y la pérdida total de las siembras, garantizando un mejor rendimiento y una menor dependencia de insumos externos.

Las cualidades previamente mencionadas podrían aprovecharse para obtener SNPs con perfiles óptimos de liberación, capaces de resistir condiciones extremas sin comprometer la integridad de los compuestos activos. Bajo este panorama, la producción de nanopartículas de almidón a partir de especies locales tendría un doble efecto positivo: por un lado, se incrementaría la eficiencia agronómica, al proporcionar insumos más duraderos y menos agresivos con el ambiente; por otro, se fomentaría la economía rural al generar cadenas de valor que involucran la revalorización de cultivos autóctonos y la incorporación de tecnologías avanzadas en la región. A ello se suma el potencial cultural de este enfoque, que conjuga el conocimiento ancestral de las comunidades andinas con la innovación nanotecnológica, fortaleciendo la identidad local y promoviendo la autosuficiencia productiva.

Por consiguiente, el presente estudio tiene como objetivo realizar una revisión exhaustiva sobre el uso de nanopartículas de almidón en la agricultura. Se evaluarán las investigaciones más recientes acerca de la síntesis y propiedades fisicoquímicas de las SNPs, valorando su viabilidad para mejorar la eficiencia en la liberación de nutrientes y pesticidas. Asimismo, se presentarán posibles enfoques para optimizar su comportamiento en condiciones agrícolas exigentes. Con esta revisión, se aspira a aportar un marco conceptual que oriente el desarrollo de soluciones agrícolas sostenibles y adaptadas a la realidad local, contribuyendo a la seguridad alimentaria, a la conservación de los ecosistemas y al bienestar socioeconómico de las comunidades andinas.

II. NANOPARTÍCULAS DE ALMIDÓN: UNA VISIÓN GENERAL

Las nanopartículas de almidón han sido investigadas para el desarrollo de materiales novedosos para distintas aplicaciones en medicina, farmacéutica, cosmética y agricultura [15]. Estas nanopartículas se caracterizan por su estructura interna (cristalina o amorfa) y la variedad en los tamaños de las nanopartículas. Estas modificaciones parten del principio de la ruptura de los gránulos, liberación de cadenas de amilosa y amilopectina, y al equilibrio termodinámico que alcanzan las fases solubles/insolubles en los distintos procesos de fabricación (Tabla 1) [16].

Tabla 1. Recopilatorio de diferentes técnicas de elaboración de nanopartículas de almidón (Elaborado en base al estudio de Ref. [17])

Tipo de procesos	Top-down	Bottom-up
Técnicas	Hidrólisis ácida Hidrólisis enzimática Molienda fina	Autoensamblado (self-assembly) Electrosprayado Electrospinning Emulsión (O/W, W/O) Formación compleja fotoelectrolítica Nanoprecipitación Recristalización

De acuerdo a la literatura, la técnica más sencilla para elaborar nanopartículas de almidón que encapsule sustancias es la **nanoprecipitación** [12], [18]. Esta técnica, que fue desarrollado por Fessi et al. [19], consiste en la deposición interfacial de cadenas poliméricas, seguida de la sustitución de un disolvente semipolar soluble en agua. La nanoprecipitación facilita el trabajo con biopolímeros solubles en agua, principalmente, y presenta beneficios debido a su simplicidad y bajo consumo energético. [20]. El proceso permite emplear agua como fase polar y alcoholes (p.e. etanol o propanol) como fase orgánica. Es decir, se permite el empleo de solventes poco agresivos con el medio ambiente. De acuerdo a los estudios de Ref. [16], la estructura de las nanopartículas de almidón obtenidas por nanoprecipitación no muestra variaciones, independientemente de la fuente de origen. Sin embargo, la cristalinidad de las nanopartículas aumenta conforme al contenido de amilosa del almidón nativo. De esta manera, diferentes sustancias activas se disuelven y sus moléculas pueden dispersarse para facilitar la absorción y encapsulamiento, mediante mecanismos como enlaces de hidrógeno o fuerzas de Van Der Waals. [21], [22].

Las nanopartículas de almidón, en el ámbito médico y farmacéutico, han sido investigadas para el transporte de sustancias activas (farmacéuticos y nutraceuticos) y las estrategias en el diseño de las nanopartículas van por la modificación química del almidón, por ejemplo, realizar modificaciones para generar superficies sensibles al pH como carboxilación [23], PEGilación [24] o acetilación [25]. En la industria de empaques y embalajes, ha servido como material de refuerzo para otros biopolímeros como otros almidones, PLA o polisacáridos de algas [26]. Los nanocristales de almidón, por otro lado, se han empleado como agentes de relleno y de refuerzo mecánico en la elaboración de películas

delgadas [27], aunque también se han reportado el empleo de nanopartículas con dominios amorfos [28]. En la industria de la energía y electrónica, las nanopartículas han servido para el diseño de dispositivos flexibles [29]; y en la mitigación de impactos ambientales, las nanopartículas de almidón han servido como transportadores de sustancias para degradar tintes o para absorber sustancias [30]. Un resumen de ello se muestra en la Fig. 1. En conclusión, las nanopartículas de almidón han mostrado un notable potencial para ser utilizadas como excipientes (transportadores) y, según las modificaciones que se apliquen, su uso puede ser adaptado para dosificación a través de diferentes vías.

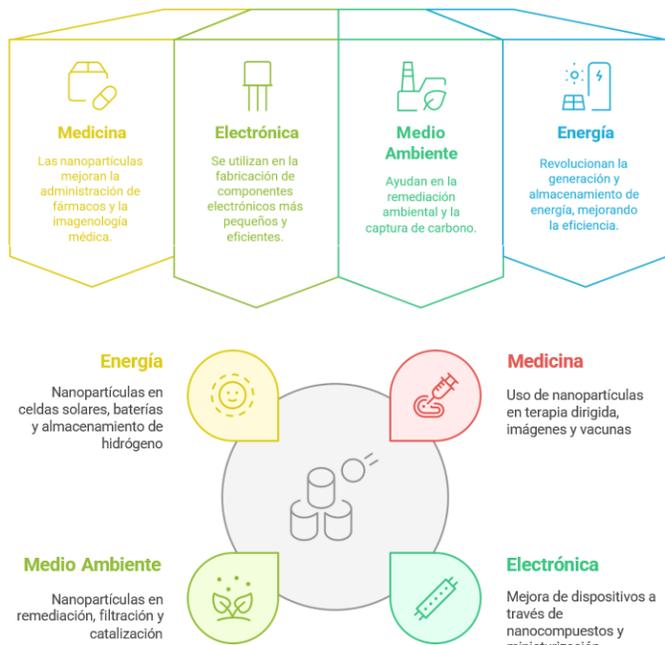


Fig. 1. Principales aplicaciones de las nanopartículas de almidón en diversos sectores.

III. METODOLOGÍA

Para esta revisión sistemática se realizó una búsqueda bibliográfica según el protocolo de exploración y selección de estudios. La búsqueda de la información se realizó en los siguientes motores de búsqueda: SCOPUS (<https://www.SCOPUS.com>), ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com>), y Scielo (<https://scielo.org/>), dado el carácter multidisciplinario de estas plataformas, la disponibilidad de los campos de título y resumen, y la posibilidad de realizar búsquedas combinadas.

Como primer paso, se planteó la pregunta de investigación de la RSL:

“¿Qué potenciales aplicaciones tienen las nanopartículas de almidón en la industria agrícola?”

Después de ello, se estableció la estrategia PICO, (Problema, Intervención, Comparación y Outcomes-

resultados), la cual se visualiza en la Tabla 2. Con ello se plantean las preguntas específicas de investigación. Además, fue aplicada en la selección de búsqueda, dichas preguntas se visualizan en la Tabla 2.

TABLA 2
Preguntas y dimensiones para el marco PICO

	Pregunta	Dimensión
P	¿Qué nanopartículas en base a almidón se emplean en agricultura?	Identificación de los tipos de nanopartículas de almidón empleadas
I	¿Qué técnicas de elaboración de nanopartículas son empleadas?	Técnicas para elaborar nanopartículas de almidón
C	¿Qué características deben tener las nanopartículas de almidón para ser empleadas en agricultura?	Características de las nanopartículas de almidón.
O	¿Qué resultados ha demostrado la aplicación de nanopartículas de almidón en la agricultura?	Beneficios y retos de emplear nanopartículas de almidón en la agricultura.

Tras la definición de las preguntas de investigación, se establecieron las palabras claves (Tabla 3) para cada dimensión. Junto con ello se estableció una ecuación de búsqueda la cual se introdujo en la plataforma SCOPUS.

TABLA 3
Palabras claves seleccionadas.

	Palabras claves
P	"starch nanoparticles" OR "starch nanocrystals" OR "starch nanocapsules" OR "starch nanospheres"
I	"bottom up" OR "bottom down" OR "nanoprecipitation" OR "hydrolysis" OR "crosslinking"
C	"size" OR "release" OR "burst release" OR "entrapment" OR "entrapment efficiency"
O	fertilizer OR soil OR harvest OR harvesting OR crops OR "food health" OR "nutrient" OR food OR agroforestry OR agriculture

Ecuación de búsqueda:

(TITLE-ABS-KEY ("starch nanoparticles" OR "starch nanocrystals" OR "starch nanocapsules" OR "starch nanospheres") AND TITLE-ABS-KEY ("bottom up" OR "bottom down" OR "nanoprecipitation" OR "hydrolysis" OR "crosslinking") AND TITLE-ABS-KEY ("size" OR "release" OR "burst release" OR "entrapment" OR "entrapment efficiency") AND TITLE-ABS-KEY (fertilizer OR soil OR harvest OR harvesting OR crops OR "food health" OR "nutrient" OR food OR agroforestry OR agriculture))

Como se menciona líneas arriba, la ecuación de búsqueda se introdujo en la plataforma SCOPUS; mientras que para las otras plataformas se emplearon diversas combinaciones para la búsqueda de artículos. Las palabras claves empleadas para la búsqueda se colocaron tanto en idioma inglés como español y se hizo énfasis en la búsqueda dentro del título, resumen y palabras claves., a fin de garantizar una recuperación precisa y relevante de los estudios. Las áreas temáticas donde predominan los artículos elegidos para análisis son: “Química”, “Agricultura y Ciencias Biológicas”, “Ciencia de Materiales” e “Ingeniería Química”, que representan el 80% de los artículos elegidos. Por otro lado, en ScienceDirect, la búsqueda se llevó a cabo empleando

una combinación de las palabras claves elegidas en la Tabla 3 y las áreas temáticas más usuales para los artículos elegidos para revisión fueron: “Agricultura y Ciencias Biológicas”, “Bioquímica, Genética y Biología Molecular” y “Ciencias ambientales”, que reúnen cerca del 83% de los artículos elegidos. De manera similar, se ejecutó la búsqueda EN Scielo, aunque solo se encontró un artículo, correspondiente al área de “Ingeniería”.

Para la selección de artículos, se empleó la metodología de PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que permite articular la selección de artículos en base a criterios de inclusión (CI) y exclusión (CE), asegurando transparencia y replicabilidad. Los criterios se muestran en la Tabla 4. En la Fig. 2 se muestra el esquema de búsqueda, selección y elección de información. De 229 estudios encontrados, se seleccionaron 9 para el análisis.

TABLA 4
Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de Inclusión (CI)	
CI 1	Los estudios incluidos deben abordar el tema de elaboración de nanopartículas de almidón.
CI 2	Los estudios deben aplicar y/o describir los beneficios de las nanopartículas de almidón en alimentos.
CI 3	Estudios dentro de los últimos 5 años (2020-2024).
Criterios de Exclusión (CE)	
CE 1	Artículos de revisión o sin evidencia experimental.
CE 2	Artículos con aplicaciones diferentes al campo de la agricultura.
CE 3	Artículos que no describan características fisicoquímicas de las nanopartículas de almidón.
CE 4	Artículos que no reportan el desarrollo experimental de nanopartículas de almidón en agricultura.

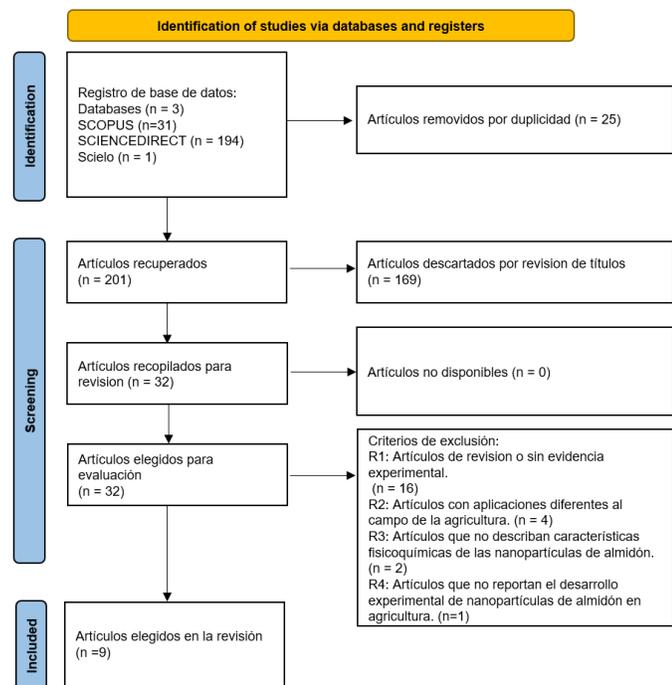


Fig. 2. Esquema PRISMA para la identificación de estudios.

Los artículos elegidos se muestran en la Tabla 5, detallando el título del estudio, la revista, año y autores. Esta clasificación permite visualizar la relevancia de los estudios relacionados y la procedencia de los autores. De los estudios elegidos, todos corresponden a revistas indexadas a SCOPUS pertenecientes al cuartil Q1, incluso con factores de impacto mayores a 4.5. Ello demuestra que el tema abordado como parte de esta RSL es relevante para revistas prestigiosas. Por otro lado, los autores que han participado en las investigaciones provienen, sobre todo de India y China (6 de 9 estudios), los países más poblados del mundo y que se encuentran en constante búsqueda de soluciones a los problemas alimentarios. Todo ello valida la relevancia científica y tecnológica de estas investigaciones.

TABLA 5
Información de los estudios elegidos.

Nombre del artículo	Revista	Año	Autores
Small-sized starch nanoparticles for efficient penetration of plant cells	Chemical Communications (Q1; IF:6.22)	2024	Chen, Y. (China), Jiang, S. (China), Wang, Y. (China), Zhang, F. (China), Wang, L. (China), Zhao, L. (China), Liu, S. (China), Tan, J. (Dinamarca), Persson, S. (Suecia), Sun, B. (China), Chen, J. (China), Blennow, A. (Dinamarca)
Double-walled encapsulation of curcumin in starch and cellulose, its characterization and application as a sensing material to monitor food quality	International Journal of Biological Macromolecules (Q1, IF: 7.7)	2024	Ahmad, M. (India), Saedi, S. (Irán), Muthukumarappan, K. (USA), Shah, M. A. (India), Gani, A. (India), Mushtaq, M. (India), Sher, M. (India)
Upcycling of industrial pea starch by rapid spray nanoprecipitation to develop plant-derived oil encapsulated starch nanoparticles for potential agricultural applications	Carbohydrate Polymers (Q1, IF: 10.7))	2024	Barbhuiya, R. I. (India), Wroblewski, C. (Canadá), Ravikumar, S. P. (India), Kaur, G. (India), Routray, W. (India), Subramanian, J. (India), Elsayed, A. (Egipto), Singh, A. (Canadá)
Optimization Model of Starch Nanoparticles Production Loaded with Phenolic Compounds from Green Propolis Extract	Journal of Polymers and the Environment (Q1, IF: 4.7)	2024	Chacon, W. D. C. (Colombia), Monteiro, A. R. (Brasil), Verruck, S. (Brasil), Valencia, G. A. (Colombia)
Bio-based starch nanoparticles with controlled size as antimicrobial agents nanocarriers	Reactive and Functional Polymers (Q1, IF: 4.5)	2024	Morán, D. (España), Marefatí, A. (Irán), Luque, S. (España), Schmidt, M. (Alemania), Rayner, M. (Suecia), Blanco-López, M. C. (España), Gutiérrez, G. (España), Matos, M. (España)
Co-encapsulation of multivitamins in micro & nano-sized starch, target release, capsule characterization and interaction studies	International Journal of Biological Macromolecules (Q1, IF: 7.7)	2023	Ahmad, M. (India), Hassan, I. (India), Shah, M. A. (India), Gani, A. (India), Muthukumarappan, K. (USA)
Synthesis and characterization of controlled-size starch nanoparticles modified with Short Chain Fatty Acids	Food Bioscience (Q1, IF: 4.8)	2023	Morán, D. (España), Abdul Hadi, N. (Malasia), Schmidt, M. (Alemania), Rayner, M. (Suecia), Gutiérrez, G. (España), Matos, M. (España)

Nombre del artículo	Revista	Año	Autores
Synthesis of starch nanoparticles with controlled morphology and various adsorption rate for urea	Food Chemistry (Q1, IF: 8.5)	2022	Pan, X. (China), Liu, P. (China), Wang, Y. (China), Yi, Y. ling (China), Zhang, H. qin (China), Qian, D. W. (China), Xiao, P. (China), Shang, E. xin (China), Duan, J. A. (China)
Fabrication of zein-modified starch nanoparticle complexes via microfluidic chip and encapsulation of nisin	Current Research in Food Science (Q1, IF: 6.2)	2022	Liu, X. (China), Ibarra-Sánchez, L. A. (México), Miller, M. J. (EE. UU.), Lee, Y. (Corea del Sur)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras la búsqueda y selección de artículos, se eligieron 9 artículos en base a la aplicación de nanopartículas de almidón, y los resultados se muestran en la Tabla 6. Los estudios recuperados exploran diversas fuentes de almidón, como la castaña de agua, guisante, yuca, maíz, quinua, y *Trichosanthes kirilowii*, y cómo las nanopartículas de almidón derivadas de estos pueden ser empleadas para mejorar la efectividad en la liberación controlada de compuestos activos como vitaminas, compuestos lipídicos, compuestos fenólicos y urea.

La técnica de nanoprecipitación es la técnica más empleada en la elaboración de nanopartículas, dentro de este estudio (5 de 9 estudios). La técnica de nanoprecipitación contempla una separación de nanopartículas de almidón en medios orgánicos debido a que el cambio de polaridad permite la precipitación [20]. Dentro de los solventes más empleados están acetona, cloruro de metileno, dioxano y hexano y alcoholes [31], [32]. Adicionalmente, los solventes orgánicos empleados tienen la capacidad de disolver sustancias hidrofóbicas, como diversos fármacos y sustancias bioactivas, por lo que este método es muy empleado para la elaboración de sistema de encapsulamiento y transporte de sustancias activas [31]. El empleo de surfactantes, además, es un aspecto importante al momento de diseñar nanopartículas. Dentro de los más empleados están los polisorbatos [33]. Estas moléculas son de carácter ambifílico, de aspecto aceitoso que permiten diluir sustancias lipofílicas, tales como diversos medicamentos, hormonas y aceites [34], [35]. Para este estudio, las nanopartículas identificadas mostraban diámetros promedio que varían en el rango de los 20 nm a 795 nm, lo cual es adecuado para aplicaciones de liberación controlada y una mayor eficacia en la interacción con las superficies biológicas [36].

En los principales hallazgos, se identifican dos ventajas sustanciales de uso de nanopartículas de almidón en la agricultura: una mayor capacidad de adsorción y una liberación más eficiente de compuestos bioactivos. Un caso representativo es el estudio sobre nanopartículas derivadas de *Trichosanthes kirilowii* (TKP), el cual evidenció una tasa de adsorción de urea significativamente superior a la de formulaciones convencionales, aspecto clave en el diseño de fertilizantes de liberación lenta y controlada [37]. Además, los estudios de almidón modificado con OSA indican que el grado

de cristalinidad y la morfología de las nanopartículas afectan directamente el rendimiento en términos de adsorción y liberación de compuestos activos. Las modificaciones realizadas a almidón pueden traer beneficios que potencien sus características. Por ejemplo, la modificación con anhídrido octenil succínico (OSA), permite generar regiones cristalinas en el almidón que permite que sus partículas protejan las sustancias encapsuladas y regulen la velocidad de liberación [22], [38]. Otra modificación que se emplea sería la modificación con poli-etilenglicol (PEG), que permite mejorar las interacciones entre proteínas y nanopartículas, lo que mejoraría la selectividad (targeting) de los sistemas de transporte de sustancias [39]. Modificaciones adicionales que podrían explorarse serían las superficiales tales como la acetilación o propilación con el fin de mejorar la dispersión y estabilidad de nanopartículas en medios acuosos y aumentar la solubilidad de sustancias hidrofóbicas y ambifílicas [25]. Otros métodos reportados en la Tabla 6 son la molienda mecánica y microfluídica. En cuanto a la molienda, el grupo de investigación de Ahmad et al. [40], [41] reportó que los gránulos de almidón pasan por una reducción de tamaño en un molino de bolas. Adicionalmente, en la metodología también se menciona que el almidón molido pasa por un tratamiento alcalino para solubilizar el almidón y lograr una precipitación con etanol, similar al proceso de nanoprecipitación, donde se busca disolver y dispersar las cadenas poliméricas para después precipitarlas en algún alcohol [12], [42], [43]. Finalmente, el proceso de elaboración por microfluído reportado por Liu et al. [44] empleó soluciones de almidón entre 0.5% y 10% en peso las cuales fluyeron por un chip microfluídico de 100 µm a 10-30 ml/h. Esta técnica de elaboración ha permitido tener una menor dispersión de tamaños junto con una mayor estabilidad de las suspensiones.

Por otro lado, los estudios señalan que las nanopartículas de almidón pueden ser utilizadas un amplio espectro de aplicaciones para las nanopartículas de almidón en la industria agrícola, desde la liberación controlada de fertilizantes y compuestos bioactivos, hasta el mejoramiento de la eficiencia en el uso de recursos. Por ejemplo, el uso de nanopartículas cargadas con aceite de neem (insecticida y repelente) y extracto de propóleo (usado como funguicida en solución) proporciona una plataforma eficaz para aplicaciones agrícolas sostenibles en el transporte de especies lipídicas con poco impacto al medio ambiente. Otros extractos que se pueden emplear como pesticidas, similares a los aceites previamente mencionados, están los aceites de ajo (insecticida y funguicida) [45], menta (funguicida)[46], eucalipto (insecticida y funguicida) [47] y lavanda (bactericida y funguicida) [48].

En cuanto a la capacidad de transportar nutrientes, pocos estudios exploran esta posibilidad. Los trabajos publicados por Ahmad et al. [40], Morán et al. [49] y de Pan et al. [37] indican que se pueden transportar vitaminas, compuestos fenólicos (como la vanilina) y urea (fertilizante), respectivamente. Las vitaminas pueden tener naturalezas lio-solubles (A, D, E y K) e hidrosolubles (C y B) y pueden

beneficiar el mejoramiento de los cultivos. Si bien las plantas producen sus propias vitaminas, la aplicación exógena de ciertas vitaminas como B1, B2 o niacina puede aportar a los procesos metabólicos de las plantas tales como la respiración celular, síntesis de proteínas y producción de energía. Boubakri et al. [50] en su estudio sugiere que las vitaminas cumplen la función de inductores de la resistencia a enfermedades en las plantas, y pueden tener roles de protección, defensas del hospedador y señalización hormonal. De este modo, el transporte de vitaminas mediante nanopartículas podría proveer un mejoramiento de cultivos. Por otro lado, es de especial interés es el caso de la urea

porque ofrece la posibilidad de transportar y liberar esta molécula de manera más eficiente, puesto que la dosificación dependería de la capacidad de degradación de las nanopartículas de almidón, similar a lo que sucede con estudios sobre fármacos [51]. Por otro, la urea ha demostrado una buena afinidad con las partículas de almidón, por lo que podría absorberse hasta una tasa de 135.60 mg/g SNP's [37]. Finalmente, esto puede repercutir en la producción de vitaminas, puesto que la urea, al ser un fertilizante nitrogenado, promueve la formación de vitaminas, aunque su dosificación excesiva podría generar exceso de carotenos o reducción de ácido ascórbico [52].

TABLA 6
Resumen de estudios recopilados de nanopartículas de almidón.

Nº	Fuente de almidón	Diámetro promedio	Técnica de procesamiento	Sustancia encapsulada	Resultados	Ref.
1	Castaña de agua	362 nm (DLS)	Molienda mecánica seguido de una co-encapsulación de vitaminas	Vitaminas D, E, B1 y B2	El estudio concluyó que las micro y nanopartículas de almidón podrían encapsular multivitaminas en su matriz. La eficiencia de encapsulación de la vitamina D fue muy baja, lo que sugiere la limitación del almidón como portador de vitaminas liposolubles. La reducción del tamaño del almidón conduce a una mejor encapsulación en comparación con las micropartículas de almidón. Estas cápsulas cargadas de multivitaminas se pueden utilizar para la fortificación directa en diferentes alimentos.	[40]
2	Castaña de agua	795.13 nm (DLS)	Molienda mecánica seguido de una encapsulación de doble pared con nanocelulosa	Cúrcuma	Se empleó la técnica de encapsulación de doble pared para proteger la funcionalidad de la curcumina para una aplicación eficaz en el material de recubrimiento comestible basado en sensores. La curcumina se encapsuló en dos formas en un complejo de celulosa de tamaño nanométrico/almidón de tamaño nanométrico y celulosa de tamaño nanométrico/almidón de tamaño micrométrico.	[41]
3	Arveja	257 nm (DLS)	Nanoprecipitación por pulverización	Aceite de neem	Las nanopartículas esféricas de almidón demostraron una liberación sostenida del aceite en comparación con el aceite libre cuando se dispersaron en agua. Se concluyó que las nanopartículas esféricas de almidón sintetizadas con liberación controlada tienen el potencial de utilizar los desechos industriales de almidón de guisante para la administración de pesticidas naturales en la agricultura.	[15]
4	Mandioca (yuca)	145.3 nm (DLS)	Precipitación antisolvente (nanoprecipitación)	Compuestos fenólicos de extracto de propóleo verde	El uso de compuestos fenólicos en nanopartículas de almidón mejora su estabilidad, eficiencia de adsorción y proporciona una plataforma de liberación controlada, lo que las hace prometedoras para aplicaciones alimentarias y farmacéuticas.	[53]
5	Almidón de maíz con alto contenido de amilosa	20 nm (SEM)	Oxidación TEMPO + Amidación	Azul Nilo A (NB)	Se diseñaron nanopartículas de almidón conteniendo azul Nilo A (NB@G50-NP) para investigar la penetración a través de la pared celular de la planta. Se demostró que las NB@G50-NP de 20 nm pueden cruzar espontáneamente la barrera de la pared celular y son absorbidas rápidamente por las raíces de Arabidopsis en un corto tiempo (30 min). Los hallazgos sugieren que los sNP ofrecen ventajas significativas para la obtención de imágenes de células vivas en plantas y proporcionan una base para futuras aplicaciones de las nanopartículas en la nanotecnología vegetal, incluidos los nanofertilizantes, los nanopesticidas y la ingeniería genética vegetal.	[54]
6	Almidón modificado con anhídrido octenil succínico (OSA)	117.8 nm (DLS)	Microfluídica	Nisina	A medida que aumentó la concentración de almidón OSA, el diámetro efectivo de las nanopartículas de zeína aumentó. La eficiencia de encapsulación de la nisina se correlacionó positivamente con la concentración de almidón OSA. La actividad antimicrobiana de la nisina en el queso fresco también aumentó hasta los 3 días de almacenamiento a medida que aumentaba la concentración del almidón OSA.	[44]

Nº	Fuente de almidón	Diámetro promedio	Técnica de procesamiento	Sustancia encapsulada	Resultados	Ref.
7	Quinua	96–170 nm (DLS)	Nanoprecipitación	Ácidos grasos de cadena corta (SCFA)	Los espectros FTIR demuestran que los ácidos grasos han modificado la estructura de nanopartículas (SNP) de almidón. Por lo tanto, considerando los beneficios para la salud de los SCFA, los SCFA-SNP producidos podrían tener un gran interés para diferentes aplicaciones clínicas, farmacéuticas y alimentarias en las que se requiere un tamaño y forma de partícula específicos, como podría ser su uso como nanotransportadores potenciales para la liberación controlada de biocompuestos o como aditivos o estabilizadores para formulaciones nutraceuticas de grado alimenticio.	[55]
8	Amaranthus, quinua y arroz	54–108 nm (DLS)	Nanoprecipitación	Vanilina	Se demostró la viabilidad de utilizar nanopartículas de almidón como nanotransportadores de compuestos con actividad antimicrobiana. El análisis de RMN mostró la presencia de vanilina adsorbida por los SNPs y se obtuvo una eficiencia de encapsulamiento del 30%, capacidad de carga del 60% y eficiencia de carga del 5,8%. Finalmente, se demostró la capacidad inhibitoria frente a <i>E. coli</i> .	[49]
9	Maiz, papa y pulpa de <i>Trichosanthes kirilowii</i>	95–150 nm (DLS)	Nanoprecipitación asistida por ultrasonido	Úrea	Se obtuvieron diversas morfologías al usar almidón de maíz, papa o pulpa de <i>Trichosanthes kirilowii</i> (TKP) para producir nanopartículas. Los resultados mostraron que las nanopartículas de TKP con morfología de película demostraron una mejorada tasa de adsorción de urea. Las nanopartículas se pueden desarrollar utilizando el método de nanoprecipitación asistida por ultrasonido, y el tamaño de las partículas, junto con la morfología de la superficie, puede variar según la fuente de almidón y el método de preparación, siendo la morfología de la superficie el factor clave para alterar el rendimiento de adsorción.	[37]

Otro aporte interesante de las nanopartículas se da en el campo de la imagenología celular (cell imaging). Las nanopartículas han demostrado ser lo suficientemente pequeñas para atravesar membranas celulares, lo que permitiría comprender procesos celulares, evaluar respuesta a patógenos, investigar en señalización celular y el mejoramiento de cultivos a partir de nuevas tecnologías agrícolas [56]. Las plantas incluso, son capaces de absorber nanopartículas a partir del mismo suelo y difundir por todo el cuerpo, y diversos estudios corroboran ello con nanopartículas de oro y plata [57], [58]. En el estudio de Chen et al. [54] empleó nanopartículas de almidón que contenían el colorante Azul Nilo, concluyendo que las SNP de 20 nm pueden atravesar espontáneamente la barrera de la pared celular y son rápidamente absorbidas por las raíces de *Arabidopsis* en un período de 30 min, aproximadamente, y el tinte es detectable mediante fotoluminiscencia. Por tanto, el empleo de nanopartículas en el estudio y mejora de los cultivos es una alternativa que merece mayor atención, principalmente por las características de las SNP como su tamaño reducido y la capacidad de biodegradarse.

En la Fig. 3. representa las aplicaciones donde las nanopartículas SNP podrían impactar en la productividad agrícola. Dentro de los principales beneficios es importante destacar la mejor administración de pesticidas, herbicidas y fertilizantes [59]. Uno de los beneficios más importantes es la dosificación controlada de sustancias. Esto permitiría un mejor aprovechamiento pues se podría reducir la cantidad de nutrientes o pesticidas añadidos en exceso. Los mecanismos de liberación son muy variados y dependen de la naturaleza del transportador (carrier) [12], [60], [61]. Para las SNP's, los mecanismos más conocidos serían la liberación rápida,

seguida de una liberación controlada. Sin embargo, en medios simulados, la liberación además podría controlarse en base a las condiciones de degradación del medio [62]. Adicionalmente, las SNP son materiales biodegradables, por lo que contribuyen con un menor impacto ambiental, aprovechando un recurso abundante en la naturaleza como es el almidón. Por otro lado, se han identificado estudios que muestran el potencial de las SNP para el monitoreo, diagnóstico mejoramiento de cultivos, siendo “cell imaging” una propuesta interesante para estudiar y evaluar el desarrollo y crecimiento de cultivos.



Fig. 3. Potencial aplicación de las nanopartículas en la agricultura.

Como se mencionó líneas arriba, todas las potenciales aplicaciones de las SNP en agricultura. Es importante destacar que actualmente existen desafíos en esta industria donde los nuevos materiales pueden aportar. La eficiencia en los fertilizantes y el control de plagas se vuelven un aspecto crucial desde el punto de vista económico y de salubridad.

Debido al incremento de la población y la creciente demanda, se está haciendo evidente el desgaste de los suelos a nivel mundial. Incluso, se han reportado casos en África [63] e India [64] donde la mala dosificación y disposición de fertilizantes químicos han causado que los rendimientos de cultivos por metro cuadrado no sean los adecuados. Sin embargo existe evidencia que la dosificación controlada puede mejorar los rendimientos, por ejemplo, en el cultivo de maíz [65] y trigo [66] en China. Como mencionan Smith et al. [67], si bien las plantas requieren nutrientes, vitaminas y fertilizantes, el efecto es nulo si la calidad del suelo no es adecuada. Todos estos aspectos influyen en la productividad agrícola mejorada, destacando la importancia de una gestión eficiente y sostenible en los sistemas agrícolas (Fig. 4).

En base al análisis de los estudios revisados, es importante destacar que la nanotecnología ofrece soluciones innovadoras en la mejora de cultivos, mediante el transporte de nutrientes y fertilizantes, y reducción de los impactos medioambientales. En particular, el uso de nanopartículas de almidón (SNPs) juega un papel crucial en el transporte controlado de nutrientes y fertilizantes, lo que no solo optimiza la absorción de estos insumos por parte de los cultivos, reduciendo significativamente la pérdida prematura de los compuestos activos. Esta liberación controlada permite una aplicación más precisa y eficiente de los insumos, minimizando los excesos que, de otro modo, podrían causar daños al medio ambiente y a los ecosistemas circundantes. Además, las SNPs se destacan por su biodegradabilidad, lo que las convierte en una opción ecológica frente a los materiales sintéticos no biodegradables que, a menudo, generan residuos perjudiciales. Finalmente, es importante destacar que existen indicadores que deben ser tomados en cuenta para futuros avances en este campo de conocimiento:

- **Impacto ecológico y sostenibilidad:** La absorción de nutrientes a pequeña escala permite optimizar el uso de fertilizantes, lo que reduce la contaminación de suelos [68]. Estudios similares podrían extenderse hacia el estudio de retención de líquidos para combatir sequías y/o falta de sales en los suelos. Adicionalmente, sería interesante explorar el uso de pesticidas para combatir plagas, sin que su aplicación tenga un impacto ambiental negativo, sobre todo en la calidad del suelo.
- **Biodegradabilidad y toxicidad:** El almidón es un biopolímero caracterizado por su biodegradabilidad, nula toxicidad y capacidad de interactuar con el agua. Estudios desarrollados para nanopartículas de almidón confirman estos hallazgos mediante estudios microbiológicos en células [60, 69, 70] y plantas [54]. Por otro lado, el almidón y nanopartículas han demostrado capacidad de degradarse en suelos gracias a la acción de α -amilasa de los microorganismos [26], [71]. Otros estudios han abordado que la toxicidad de las nanopartículas biopoliméricas como almidón [60] o quitosano [72] y se demuestra que sus productos no afectan el crecimiento o proliferación de células ni de otros organismos, por lo que se refuerza su aplicabilidad en el campo de la agricultura.

- **Mejor uso de fertilizantes:** El uso de fertilizantes transportados con nanopartículas tiene el potencial de revolucionar la agricultura. Los nano-fertilizantes, adaptados a las zonas agroecológicas específicas de cada región, pueden optimizar el rendimiento de los cultivos utilizando menos recursos y teniendo un menor impacto ambiental. Sin embargo, crear fertilizantes adaptados a las diversas condiciones del suelo y clima es un desafío. Khundi et al. [73] sostiene, por ejemplo, que, en regiones africanas, la producción agrícola ha sido limitada por factores como la escasez de recursos y el uso ineficiente de fertilizantes convencionales, sin embargo con el uso de nanofertilizantes se ha logrado un incremento de 25% en la producción de maíz, y una reducción de 40% en el uso de fertilizantes nitrogenados

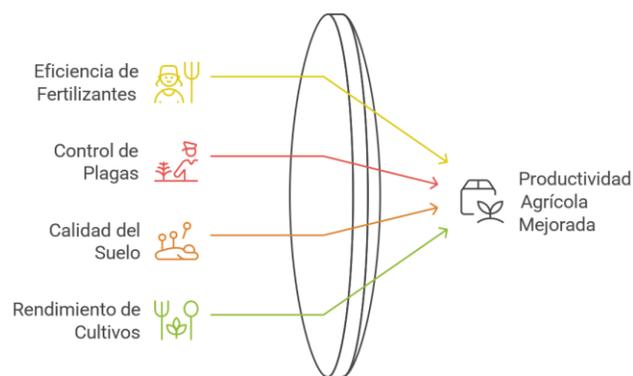


Fig. 4. Aplicación de nanopartículas en agricultura.

V. CONCLUSIONES

En conclusión, las nanopartículas de almidón (SNPs) han demostrado un gran potencial en diversas aplicaciones en la industria de la agricultura, especialmente en la liberación controlada de nutrientes y pesticidas. Los estudios revisados destacan la versatilidad de las SNPs, las cuales pueden encapsular una amplia gama de compuestos bioactivos como vitaminas, aceites esenciales, urea y compuestos fenólicos, mejorando así la eficiencia en su liberación y reduciendo la volatilización o degradación prematura. La técnica de nanoprecipitación se ha consolidado como la más utilizada para la síntesis de estas nanopartículas, mostrando un control efectivo sobre el tamaño y la morfología, lo que facilita su adaptación a diferentes necesidades agrícolas. Las modificaciones en el almidón, como el uso de anhídrido octenil succínico (OSA) o modificación superficial con ácidos grasos, han demostrado ser eficaces para mejorar la encapsulación y la estabilidad de los compuestos activos. Además, las SNPs muestran un potencial significativo para el transporte eficiente de pesticidas, fertilizantes y nutrientes, permitiendo su liberación controlada y reduciendo el impacto ambiental en condiciones agrícolas desafiantes. Por lo tanto, las nanopartículas de almidón presentan una alternativa innovadora y ecológica para mejorar la eficiencia agrícola, con beneficios tanto agronómicos como socioeconómicos. Futuros

estudios deben enfocarse en la investigación en la modificación de almidones, reducción de costos y adecuación a los marcos regulatorios.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los investigadores desean agradecer a la Universidad Privada del Norte por su apoyo financiero a los trabajos del curso “Procesos Unitarios” de la Facultad de Ingeniería en el ciclo 2024-2.

REFERENCIAS

- [1] S. M. Tenorio-Bautista and M. R. N. De La Cruz, “Análisis de la diversidad de papas (*Solanum* spp.) con marcadores moleculares microsatélite de los distritos de Secclla y Santo Tomás de Pata (Huancavelica) y Santillana (Ayacucho),” *J. Selva Andin. Res. Soc.*, vol. 10, no. 1, pp. 4–15, 2019, [Online]. Available: http://www.scielo.org/bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942019000100002.
- [2] M. Tudi *et al.*, “Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment,” *Environ. Research public Heal.*, vol. 18, no. 1112, pp. 1–23, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>.
- [3] A. Lozano-Povis, C. E. Alvarez-Montalván, and N. Moggiano, “Climate change in the Andes and its impact on agriculture: a systematic review,” *Sci. Agropecu.*, vol. 12, no. 1, pp. 101–108, 2021, doi: [10.17268/SCI.AGROPECU.2021.012](https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2021.012).
- [4] E. Vázquez-Núñez, “Uso de nanomateriales en la agricultura y sus implicaciones ecológicas y ambientales,” *Mundo Nano. Rev. Interdiscip. en Nanociencias y Nanotecnología*, vol. 16, no. 30, pp. 1e-25e, 2022, doi: [10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69704](https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69704).
- [5] N. Castanha, M. L. Rojas, and P. E. D. Augusto, “An insight into the pasting properties and gel strength of starches from different sources: Effect of starch concentration,” *Sci. Agropecu.*, vol. 24, no. 2, pp. 203–212, 2021, doi: [10.17268/SCI.AGROPECU.2021.023](https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2021.023).
- [6] L. García-Guzmán, G. Cabrera-Barjas, C. G. Soria-Hernández, J. Castaño, A. Y. Guadarrama-Lezama, and S. Rodríguez Llamazares, “Progress in Starch-Based Materials for Food Packaging Applications,” *Polysaccharides*, vol. 3, no. 1, pp. 136–177, 2022, doi: [10.3390/polysaccharides3010007](https://doi.org/10.3390/polysaccharides3010007).
- [7] M. Ahmad, P. Mudgil, A. Gani, F. Hamed, F. A. Masoodi, and S. Maqsood, “Nano-encapsulation of catechin in starch nanoparticles: Characterization, release behavior and bioactivity retention during simulated in-vitro digestion,” *Food Chem.*, vol. 270, no. June 2018, pp. 95–104, 2019, doi: [10.1016/j.foodchem.2018.07.024](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.024).
- [8] H. Marta, D. I. Rizki, E. Mardawati, M. Djali, M. Mohammad, and Y. Cahyana, “Starch Nanoparticles: Preparation, Properties and Applications,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 5, pp. 19–25, 2023, doi: [10.3390/polym15051167](https://doi.org/10.3390/polym15051167).
- [9] T. O. Machado, J. Grabow, C. Sayer, P. H. H. de Araújo, M. L. Ehrenhard, and F. R. Wurm, “Biopolymer-based nanocarriers for sustained release of agrochemicals: A review on materials and social science perspectives for a sustainable future of agri- and horticulture,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 303, no. March, p. 102645, 2022, doi: [10.1016/j.cis.2022.102645](https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102645).
- [10] D. G. Montoya-Anaya *et al.*, “Physicochemical characterization of residual potato (*Solanum tuberosum*) starch recovered from the potato chips industry in Mexico,” *Biotecnia*, vol. 25, no. 2, pp. 60–72, 2023, doi: [10.18633/biotecnia.v25i2.1880](https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i2.1880).
- [11] A. Accinelli, “Archaeological discourses and their consequences: an approximation through the Peruvian case,” *Desde el Sur*, vol. 13, no. 3, pp. 1–11, 2021, doi: [10.21142/DES-1303-2021-0027](https://doi.org/10.21142/DES-1303-2021-0027).
- [12] E. Yupanqui, S. A. Rodriguez, and M. P. Alvites, “Synthesis, characterization and release kinetic evaluation of starch nanoparticles loaded with enrofloxacin,” *Proc. LACCEI Int. Multi-conference Eng. Educ. Technol.*, pp. 1–11, 2024, doi: [10.18687/LACCEI2024.1.1.521](https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.521).
- [13] E. Yábar-Villanueva, W. Huicho-Espinoza, A. Suazo-Peña, E. Rojas-Zacarías, and D. Álvarez-Tolentino, “Biocomponents and antioxidant capacity of native potatoes such as chuño and tunta under freezing temperature different conditions,” *Cienc. Tecnol. Agropecu.*, vol. 24, no. 1, 2023, doi: [10.21930/rcta.vol24_num1_art:2958](https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num1_art:2958).
- [14] D. Choque-Quispe *et al.*, “Physicochemical and technofunctional properties of high Andean native potato starch,” *J. Agric. Food Res.*, vol. 15, no. December 2023, 2024, doi: [10.1016/j.jafr.2023.100955](https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100955).
- [15] R. I. Barbhuiya *et al.*, “Upcycling of industrial pea starch by rapid spray nanoprecipitation to develop plant-derived oil encapsulated starch nanoparticles for potential agricultural applications,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 346, no. August, 2024, doi: [10.1016/j.carbpol.2024.122618](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122618).
- [16] Y. Qin, C. Liu, S. Jiang, L. Xiong, and Q. Sun, “Characterization of starch nanoparticles prepared by nanoprecipitation: Influence of amylose content and starch type,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 87, no. August, pp. 182–190, 2016, doi: [10.1016/j.indcrop.2016.04.038](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.038).
- [17] Q. Sun, *Starch Nanoparticles*. Elsevier Ltd, 2018.
- [18] C. E. Mora-Huertas, H. Fessi, and A. Elaissari, “Polymer-based nanocapsules for drug delivery,” *Int. J. Pharm.*, vol. 385, no. 1–2, pp. 113–142, 2010, doi: [10.1016/j.ijpharm.2009.10.018](https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2009.10.018).
- [19] H. Fessi, F. Puisieux, J. P. Devissaguet, N. Ammoury, and S. Benita, “Nanocapsule formation by interfacial polymer deposition following solvent displacement,” *Int. J. Pharm.*, vol. 55, no. 1, pp. 1–4, 1989, doi: [10.1016/0378-5173\(89\)90281-0](https://doi.org/10.1016/0378-5173(89)90281-0).
- [20] C. J. Martínez Rivas *et al.*, “Nanoprecipitation process: From encapsulation to drug delivery,” *Int. J. Pharm.*, vol. 532, no. 1, pp. 66–81, 2017, doi: [10.1016/j.ijpharm.2017.08.064](https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.08.064).
- [21] W. H. De Jong and P. J. a Borm, “Drug delivery and nanoparticles: applications and hazards,” *Int. J. Nanomedicine*, vol. 3, no. 2, pp. 133–149, 2008, doi: [10.2147/IJN.S596](https://doi.org/10.2147/IJN.S596).
- [22] L. Qi, G. Ji, Z. Luo, Z. Xiao, and Q. Yang, “Characterization and Drug Delivery Properties of OSA Starch-Based Nanoparticles Prepared in [C₃OHmim]Ac-in-Oil Microemulsions System,” *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 10, pp. 9517–9526, 2017, doi: [10.1021/acssuschemeng.7b02727](https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02727).
- [23] C. M. Paleos, Z. Sideratou, T. A. Theodossiou, and D. Tsiourvas, “Carboxylated hydroxyethyl starch: A novel polysaccharide for the delivery of doxorubicin,” *Chem. Biol. Drug Des.*, vol. 85, no. 5, pp. 653–658, 2015, doi: [10.1111/cbdd.12447](https://doi.org/10.1111/cbdd.12447).
- [24] P. F. Minimol, W. Paul, and C. P. Sharma, “PEGylated starch acetate nanoparticles and its potential use for oral insulin delivery,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 95, no. 1, pp. 1–8, 2013, doi: [10.1016/j.carbpol.2013.02.021](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.02.021).
- [25] S. H. Mahmoudi Najafi, M. Baghaie, and A. Ashori, “Preparation and characterization of acetylated starch nanoparticles as drug carrier: Ciprofloxacin as a model,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 87, no. February, pp. 48–54, 2016, doi: [10.1016/j.ijbiomac.2016.02.030](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.02.030).
- [26] F. G. Torres, O. P. Troncoso, C. Torres, D. A. Díaz, and E. Amaya, “Biodegradability and mechanical properties of starch films from Andean crops,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 48, no. 4, pp. 603–606, 2011, doi: [10.1016/j.ijbiomac.2011.01.026](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2011.01.026).
- [27] H. Y. Kim, S. S. Park, and S. T. Lim, “Preparation, characterization and utilization of starch nanoparticles,” *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 126, pp. 607–620, 2015, doi: [10.1016/j.colsurfb.2014.11.011](https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2014.11.011).
- [28] D. Le Corre, J. Bras, and A. Dufresne, “Starch nanoparticles: A review,” *Biomacromolecules*, vol. 11, no. 5, pp. 1139–1153, 2010, doi: [10.1021/bm901428y](https://doi.org/10.1021/bm901428y).
- [29] A. Tiwari, S. Singh, and P. Srivastava, “Exploring the potential of potato starch-capped TiO₂ nanoparticles for DSSC photoanodes,” *Results Opt.*, vol. 15, no. August 2023, p. 100630, 2024, doi: [10.1016/j.rio.2024.100630](https://doi.org/10.1016/j.rio.2024.100630).
- [30] F. G. Torres and G. E. De-la-Torre, “Synthesis, characteristics, and applications of modified starch nanoparticles: A review,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 194, no. August 2021, pp. 289–305, 2022, doi: [10.1016/j.ijbiomac.2021.11.187](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.187).
- [31] W. S. Saad and R. K. Prud’Homme, “Principles of nanoparticle formation by flash nanoprecipitation,” *Nano Today*, vol. 11, no. 2, pp. 212–227, 2016, doi: [10.1016/j.nantod.2016.04.006](https://doi.org/10.1016/j.nantod.2016.04.006).
- [32] S. F. Chin, A. Azman, and S. C. Pang, “Size controlled synthesis of starch nanoparticles by a microemulsion method,” *J. Nanomater.*, vol. 2014, 2014, doi: [10.1155/2014/763736](https://doi.org/10.1155/2014/763736).
- [33] S. Rodriguez, F. G. Torres, K. N. Gonzales, O. P. Troncoso, M. Fernández-García, and D. López, “Tailoring size and release kinetics of κ/ι-hybrid carrageenan microgels via a surfactant-assisted technique,” *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.*, vol. 70, no. 5, pp. 338–344, 2021, doi: [10.1080/00914037.2020.1716225](https://doi.org/10.1080/00914037.2020.1716225).
- [34] B. G. Zanetti-Ramos, E. Lemos-Senna, and H. Cramail, “The role of surfactant in the miniemulsion polymerization of biodegradable polyurethane nanoparticles,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 28, pp. 526–531, 2008, doi: [10.1016/j.msec.2007.04.041](https://doi.org/10.1016/j.msec.2007.04.041).

- [35] X. Li, Y. Qin, C. Liu, S. Jiang, L. Xiong, and Q. Sun, "Size-controlled starch nanoparticles prepared by self-assembly with different green surfactant: The effect of electrostatic repulsion or steric hindrance," *Food Chem.*, vol. 199, pp. 356–363, 2016, doi: 10.1016/j.foodchem.2015.12.037.
- [36] J. Schweska and E. Stoger, "Microparticles and nanoparticles from plants—the benefits of bioencapsulation," *Vaccines*, vol. 9, no. 4, 2021, doi: 10.3390/vaccines9040369.
- [37] X. Pan *et al.*, "Synthesis of starch nanoparticles with controlled morphology and various adsorption rate for urea," *Food Chem.*, vol. 369, no. August 2021, p. 130882, 2022, doi: 10.1016/j.foodchem.2021.130882.
- [38] S. Abbas *et al.*, "Fabrication of polymeric nanocapsules from curcumin-loaded nanoemulsion templates by self-assembly," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 23, pp. 81–92, 2015, doi: 10.1016/j.ulsonch.2014.10.006.
- [39] F. Molavi, M. Barzegar-Jalali, and H. Hamishehkar, "Polyester based polymeric nano and microparticles for pharmaceutical purposes: A review on formulation approaches," *J. Control. Release*, vol. 320, no. October 2019, pp. 265–282, 2020, doi: 10.1016/j.jconrel.2020.01.028.
- [40] M. Ahmad, I. Hassan, M. A. Shah, A. Gani, and K. Muthukumarappan, "Co-encapsulation of multivitamins in micro & nano-sized starch, target release, capsule characterization and interaction studies," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 240, no. April, p. 124367, 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124367.
- [41] M. Ahmad *et al.*, "Double-walled encapsulation of curcumin in starch and cellulose, its characterization and application as a sensing material to monitor food quality," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 280, no. P3, p. 135951, 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135951.
- [42] A. Hebeish, M. H. El-Rafie, M. A. EL-Sheikh, and M. E. El-Naggar, "Ultra-Fine Characteristics of Starch Nanoparticles Prepared Using Native Starch With and Without Surfactant," *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.*, vol. 24, no. 3, pp. 515–524, 2014, doi: 10.1007/s10904-013-0004-x.
- [43] M. E. El-Naggar, M. H. El-Rafie, M. A. El-sheikh, G. S. El-Feky, and A. Hebeish, "Synthesis, characterization, release kinetics and toxicity profile of drug-loaded starch nanoparticles," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 81, no. September, pp. 718–729, 2015, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2015.09.005.
- [44] X. Liu, L. A. Ibarra-Sánchez, M. J. Miller, and Y. Lee, "Fabrication of zein-modified starch nanoparticle complexes via microfluidic chip and encapsulation of nisin," *Curr. Res. Food Sci.*, vol. 5, no. June, pp. 1110–1117, 2022, doi: 10.1016/j.crf.2022.07.005.
- [45] J. Obagwu and L. Korsten, "Control of citrus green and blue molds with garlic extracts," *Eur. J. of Plant Pathol.*, vol. 109, pp. 221–225, 2003, doi: 10.1023/A:1022839921289.
- [46] J. S. Among and P. Ebiyo, "A review of the antifungal activities of mint plant extracts against fungal isolates," *J. Biol. Res. Biotechnol. Bio-Research*, vol. 21, no. 2, pp. 2031–2057, 2023, doi: <https://dx.doi.org/10.4314/br.v21i2.9>.
- [47] A. Abdelkhalek, M. Z. M. Salem, A. M. Kordy, A. Z. M. Salem, and S. I. Behiry, "Antiviral, antifungal, and insecticidal activities of Eucalyptus bark extract: HPLC analysis of polyphenolic compounds," *Microb. Pathog.*, vol. 147, no. June, p. 104383, 2020, doi: 10.1016/j.micpath.2020.104383.
- [48] L. A. E. Erland, C. R. Bitcon, A. D. Lemke, and S. S. Mahmoud, "Antifungal screening of lavender essential oils and essential oil constituents on three post-harvest fungal pathogens," *Nat. Prod. Commun.*, vol. 11, no. 4, pp. 523–527, 2016, doi: 10.1177/1934578x1601100427.
- [49] D. Morán *et al.*, "Bio-based starch nanoparticles with controlled size as antimicrobial agents nanocarriers," *React. Funct. Polym.*, vol. 198, no. December 2023, 2024, doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2024.105881.
- [50] H. Boubakri, M. Gargouri, A. Mliki, F. Brini, J. Chong, and M. Jbara, "Vitamins for enhancing plant resistance," *Planta*, vol. 244, no. 3, pp. 529–543, 2016, doi: 10.1007/s00425-016-2552-0.
- [51] A. Caldonazo, S. L. Almeida, A. F. Bonetti, R. E. L. Lazo, M. Mengarda, and F. S. Murakami, "Pharmaceutical applications of starch nanoparticles: A scoping review," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 181, pp. 697–704, 2021, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.03.061.
- [52] A. Mozafar, "Nitrogen fertilizers and the amount of vitamins in plants: A review," *J. Plant Nutr.*, vol. 16, no. 12, pp. 2479–2506, 1993, doi: 10.1080/01904169309364698.
- [53] W. D. C. Chacon, A. R. Monteiro, S. Verruck, and G. A. Valencia, "Optimization Model of Starch Nanoparticles Production Loaded with Phenolic Compounds from Green Propolis Extract," *J. Polym. Environ.*, vol. 32, no. 8, pp. 3946–3960, 2024, doi: 10.1007/s10924-024-03217-5.
- [54] Y. Chen *et al.*, "Small-sized starch nanoparticles for efficient penetration of plant cells," *Chem. Commun.*, vol. 60, pp. 14113–14116, 2024, doi: 10.1039/d4cc05493h.
- [55] D. Morán, N. Abdul Hadi, M. Schmidt, M. Rayner, G. Gutiérrez, and M. Matos, "Synthesis and characterization of controlled-size starch nanoparticles modified with Short Chain Fatty Acids," *Food Biosci.*, vol. 56, no. October, 2023, doi: 10.1016/j.fbio.2023.103381.
- [56] W. Li, G. S. Kaminski Schierle, B. Lei, Y. Liu, and C. F. Kaminski, "Fluorescent Nanoparticles for Super-Resolution Imaging," *Chem. Rev.*, vol. 122, no. 15, pp. 12495–12543, 2022, doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00050.
- [57] M. Gao, J. Chang, Z. Wang, H. Zhang, and T. Wang, "Advances in transport and toxicity of nanoparticles in plants," *J. Nanobiotechnology*, vol. 21, no. 1, pp. 1–16, 2023, doi: 10.1186/s12951-023-01830-5.
- [58] K. Eggenberger *et al.*, "Use of Nanoparticles to Study and Manipulate Plant cells," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 12, no. 9, pp. 1–7, 2010, doi: 10.1002/adem.201080009.
- [59] P. Wang, E. Lombi, F. J. Zhao, and P. M. Kopitke, "Nanotechnology: A New Opportunity in Plant Sciences," *Trends Plant Sci.*, vol. 21, no. 8, pp. 699–712, 2016, doi: 10.1016/j.tplants.2016.04.005.
- [60] Z. Sun, "Starch nanoparticles: modifications, toxicity, and drug loading," pp. 1–81, 2015, [Online]. Available: https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/9301/Sun_Ziyi.pdf?sequence=1.
- [61] C.-S. Liu, K. G. H. Desai, X.-H. Meng, and X.-G. Chen, "Sweet Potato Starch Microparticles as Controlled Drug Release Carriers: Preparation and In Vitro Drug Release," *Dry. Technol.*, vol. 25, no. 4, pp. 689–693, 2007, doi: 10.1080/07373930701290977.
- [62] S. Aslam, A. Akhtar, N. Nirmal, N. Khalid, and S. Maqsood, "Recent Developments in Starch-Based Delivery Systems of Bioactive Compounds: Formulations and Applications," *Food Eng. Rev.*, vol. 14, no. 2, pp. 271–291, 2022, doi: 10.1007/s12393-022-09311-5.
- [63] T. G. Abebe *et al.*, "Growing Use and Impacts of Chemical Fertilizers and Assessing Alternative Organic Fertilizer Sources in Ethiopia," *Appl. Environ. Soil Sci.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/4738416.
- [64] J. Penuelas, F. Coello, and J. Sardans, "A better use of fertilizers is needed for global food security and environmental sustainability," *Agric. Food Secur.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–9, 2023, doi: 10.1186/s40066-023-00409-5.
- [65] Z. Yao *et al.*, "Agronomic, environmental, and ecosystem economic benefits of controlled-release nitrogen fertilizers for maize production in Southwest China," *J. Clean. Prod.*, vol. 312, no. May, p. 127611, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127611.
- [66] L. Zhang *et al.*, "Integrated assessment of agronomic, environmental and ecosystem economic benefits of blending use of controlled-release and common urea in wheat production," *J. Clean. Prod.*, vol. 287, p. 125572, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125572.
- [67] A. G. Smith, M. T. Croft, M. Moulin, and M. E. Webb, "Plants need their vitamins too," *Curr. Opin. Plant Biol.*, vol. 10, no. 3, pp. 266–275, 2007, doi: 10.1016/j.pbi.2007.04.009.
- [68] J. J. Mim *et al.*, "Towards smart agriculture through nano-fertilizer-A review," *Mater. Today Sustain.*, vol. 30, no. December 2024, p. 101100, 2025, doi: 10.1016/j.mtsust.2025.101100.
- [69] H. Rostamabadi, S. R. Falsafi, and S. M. Jafari, "Starch-based nanocarriers as cutting-edge natural cargos for nutraceutical delivery," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 88, no. March, pp. 397–415, 2019, doi: 10.1016/j.tifs.2019.04.004.
- [70] S. K. Nitta and K. Numata, "Biopolymer-based nanoparticles for drug/gene delivery and tissue engineering," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 14, no. 1, pp. 1629–1654, 2013, doi: 10.3390/ijms14011629.
- [71] A. K. Maurya, A. Mishra, and N. Mishra, *Nanoengineered polymeric biomaterials for drug delivery system*. Elsevier Ltd., 2020.
- [72] M. S. Huh *et al.*, "Polysaccharide-based Nanoparticles for Gene Delivery," *Top. Curr. Chem.*, vol. 375, no. 2, 2017, doi: 10.1007/s41061-017-0114-y.
- [73] Q. Khundi, Y. Jiang, Y. Sun, and Y. Rui, "Nanofertilizers for Sustainable African Agriculture: A Global Review of Agronomic Efficiency and Environmental Sustainability," *Nanomaterials*, vol. 15, no. 5, pp. 1–24, 2025, doi: 10.3390/nano15050390.