aci avances en ciencias e ingenierías

Artículo/Article
Vol. 18, nro. 2
e4158

Extracción de quitosano a partir de cáscaras de camarón: diseño de proceso y análisis técnico-económico de esquemas lineal y circular

Paul Quezada[1], Kevin Haro[1], Augustina Cepeda[2], Samaela Montero[2], Alexis Vaca[2], José F. Alvarez-Barreto[1,2*]

[1]Maestría en Ingeniería Circular. Colegio de Ciencias e Ingenierías. Universidad San Francisco de Quito USFQ,

[2]Departamento de Ingeniería Química. Colegio de Ciencias e Ingenierías. Universidad San Francisco de Quito USFQ.

*Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail: jalvarezb@usfq.edu.ec

Chitosan extraction from shrimp shells: process design and techno-economic analysis of linear and circular schemes

Abstract

The growing demand for sustainable materials has increased interest in the valorization of agro-industrial waste for the production of biopolymers such as chitosan. This study evaluates the technical and economic feasibility of producing chitosan from Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) shell waste through a conventional chemical extraction process. A linear process was compared with a circular alternative incorporating sodium hydroxide recovery. The process was designed to produce 36 tonnes of chitosan per year. The techno-economic analysis considered net present value (NPV) and internal rate of return (IRR) over a 10-year project lifetime, using a 10 % discount rate. Both configurations yielded positive NPVs under the base-case scenario: approximately USD 6.70 million for the circular process and USD 3.62 million for the linear process, mainly due to lower operating costs associated with reagent recovery. When the chitosan selling price was reduced by 20%, the NPVs decreased to approximately USD 4.14 million and USD 1.05 million for the circular and linear processes, respectively, but remained positive. The circular configuration was therefore less sensitive to the price reduction evaluated. These results suggest that process design and resource recovery substantially influence the estimated economic feasibility of chitosan production under the assumptions evaluated.

Keywords: Chitosan, shrimp shells, circular economy, process design, techno-economic analysis, waste valorization.

OPEN ACCESS

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Editado por / Edited by:
Sebastián Ponce

Recibido / Received:
2026-02-23

Aceptado / Accepted:
2026-08-20

Publicado en línea / Published online:
16/11/2026

Resumen

La creciente demanda de materiales sostenibles ha impulsado el interés por la valorización de los residuos agroindustriales para producir biopolímeros como el quitosano. Este estudio evalúa la viabilidad técnica y económica de la producción de

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

quitosano a partir de residuos de cáscaras de camarón blanco del Pacífico (*Litopenaeus vannamei*) mediante un proceso de extracción química convencional, comparando una configuración lineal con una alternativa circular que incorpora la recuperación de hidróxido de sodio. El proceso se diseñó para producir 36 toneladas de quitosano al año. El análisis tecnoeconómico consideró el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) durante una vida útil de 10 años, con una tasa de descuento del 10 %. Ambas configuraciones presentaron VAN positivos en el escenario base: aproximadamente 6,70 millones de USD para el proceso circular y 3,62 millones de USD para el lineal, principalmente por la disminución de los costos operativos asociada a la recuperación de reactivos. Al reducir un 20 % el precio de venta del quitosano, los VAN disminuyeron a aproximadamente 4,14 y 1,05 millones de USD, para el proceso circular y lineal respectivamente, pero permanecieron positivos. La configuración circular fue, por tanto, menos sensible a la reducción de precio analizada. Estos resultados sugieren que el diseño del proceso y la recuperación de recursos influyen de forma considerable en la viabilidad económica estimada de la producción de quitosano bajo los supuestos evaluados.

Palabras clave: Quitosano, cáscara de camarón, economía circular, diseño de procesos, análisis técnico-económico, valorización de residuos.

INTRODUCCIÓN

El sistema alimentario global contribuye al 30 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI). Las emisiones de GEI se generan a lo largo de la cadena de valor del sistema alimentario, incluyendo la producción agrícola, procesamiento de alimentos, distribución, consumo y disposición de residuos [1]. Particularmente, el sector de los envases y empaques, dominado por plásticos derivados de combustibles fósiles, es responsable de aproximadamente el 36 % de la producción mundial de plásticos de un solo uso lo que contribuye significativamente a la contaminación por microplásticos y al cambio climático [2].

En Ecuador, la industria camaronera presenta un potencial considerable para el aprovechamiento de residuos. En 2020 se registraron exportaciones de aproximadamente 676 366 toneladas métricas de camarón, equivalentes a 1 491 132 214 lb [3], y el camarón blanco del Pacífico (*Litopenaeus vannamei*) fue la principal especie cultivada para exportación. El exoesqueleto o cáscara puede representar entre el 40 % y el 50 % del peso húmedo total [4], por lo que constituye un subproducto abundante cuya gestión plantea desafíos ambientales.

La gestión de este residuo acuícola es un desafío logístico y ambiental, pero simultáneamente representa una oportunidad para introducir estrategias de valorización y circularidad en la industria [5]. La solución a esta dualidad ambiental y económica reside en la composición del exoesqueleto. La cáscara de camarón es una fuente rica de quitina, el segundo biopolímero natural más abundante.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

El quitosano es un polisacárido lineal derivado de la desacetilación de la quitina obtenida mediante desproteinización de cáscara de camarón [6]. Destaca por ser un biopolímero biocompatible, biodegradable, no es tóxico, y tiene notable actividad antimicrobiana. Estas características lo hacen un candidato ideal para sustituir los plásticos convencionales, particularmente en empaques alimentarios.

A pesar del creciente interés en la valorización de los residuos de cáscara de camarón para la producción de quitosano, la mayoría de los estudios existentes se han centrado principalmente en métodos de extracción a escala de laboratorio o en la caracterización de los materiales, prestando poca atención al diseño de procesos integrados y a la viabilidad económica a nivel industrial. Además, son pocos los estudios que han evaluado comparativamente las configuraciones de procesos lineales y circulares desde un marco tecnoeconómico, especialmente en el contexto de los países en desarrollo, donde la eficiencia en el uso de los recursos y las limitaciones de costos desempeñan un papel fundamental [7, 8]. En este sentido, la conversión de residuos de cáscara de camarón en quitosano se alinea con los principios de la economía circular, al transformar un subproducto de bajo valor en un material con aplicaciones industriales de alto valor agregado dentro de esquemas de biorrefinería. Sin embargo, la implementación de estas estrategias no depende únicamente de la factibilidad técnica del proceso, sino también de su viabilidad económica y del diseño del sistema productivo.

Este estudio evalúa la viabilidad técnica y económica de la producción de quitosano a partir de residuos de cáscara de camarón mediante una ruta de extracción química convencional. Para ello compara un proceso lineal con una alternativa circular. Se desarrolla el diseño del proceso y se analizan parámetros técnicos como el rendimiento y el grado de desacetilación (GDA), integrando además un análisis técnico-económico mediante indicadores como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), para estimar el efecto de recuperación de recursos sobre la eficiencia del proceso y su desempeño económico.

METODOLOGÍA

El diseño del proceso y las condiciones operativas se definieron basándose en protocolos ampliamente documentados para la extracción de quitina y quitosano a partir de residuos de caparazón de camarón, tal como se describe en la literatura [9, 10, 11]. Este estudio no incluye una validación experimental en laboratorio; en su lugar, se basa en la simulación del proceso, cálculos de balance de masas y parámetros derivados de la literatura.

La selección de las condiciones operativas sigue las prácticas convencionales de extracción química que se utilizan habitualmente en la producción de quitosano a escala industrial y piloto y se encuentran referenciadas en las Tablas 2, 3 y 4. Aunque no existe una norma internacional específica que regule los procesos de extracción de quitosano, los parámetros de calidad relacionados, como el grado de desacetilación y la pureza, se evalúan normalmente de acuerdo con métodos analíticos descritos en la literatura y alineados con las especificaciones industriales.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

Bases de diseño de proceso

El diseño del proceso para extraer quitosano de residuos de cáscara de camarón (*Litopenaeus vannamei*) se fundamenta en la ruta química tradicional, abordada bajo principios de ingeniería circular para reducir la generación de residuos y potenciar el valor del subproducto. El objetivo principal es evaluar la viabilidad técnica y económica en la producción de quitosano estandarizado de alto grado de desacetilación (GDA) y obtener un producto con propiedades fisicoquímicas aptas para aplicaciones de alto valor (aditivos alimentarios, biomedicina o biopelículas), mediante una gestión sostenible de reactivos y efluentes.

Materia prima: cáscaras de camarón (*Litopenaeus vannamei*)

La cáscara de camarón presenta un contenido significativo de carbonato de calcio ($CaCO_3$), proteínas y quitina, siendo esta última la fracción de interés para la producción de quitosano. En base seca, la quitina representa entre el 15 y 25 % en peso de la materia prima. Con rendimientos de desacetilación del 70 al 85 %, se estima una producción potencial de 0,11–0,21 kg de quitosano por kilogramo de cáscara seca.

TABLA 1. Composición química típica de cáscaras de camarón (*Litopenaeus vannamei*) en base seca.

Componente	Contenido (% en masa)	Observaciones
Carbonato de calcio	30–50 %	Principal fracción mineral: eliminada durante la desmineralización
Proteínas solubles	25–35 %	Eliminadas por desproteinización alcalina
Quitina	15–25 %	Biopolímero estructural precursor del quitosano
Otros	5–10 %	Lípidos, pigmentos, cenizas, humedad residual.

Nota: Valores reportados en base seca [12]

Capacidad de diseño del proceso

Considerando que el proyecto busca una implementación industrial alineada con la circularidad, se propone una capacidad de procesamiento 1000 kg de cáscara seca por día. Esta escala permite validar los parámetros de rendimiento (11 %–21 % de quitosano) y GDA (> 80 %) [8]. Lertsutthiwong reporta 75 % de humedad en la cáscara de camarón fresca; [9] por ello, se requiere una alimentación en base húmeda de 4000 kg en la etapa de pretratamiento.

La Tabla 2 resume los principales criterios de diseño del proceso de extracción química: configuración operativa, etapas unitarias, reactivos empleados y supuestos técnicos. El proceso se define como batch adecuado para operaciones secuenciales sólido–líquido, e incorpora parámetros de eficiencia de reacción, control de calidad de la materia prima y estrategias de gestión del agua orientadas a la reducción del consumo de recursos y al fortalecimiento de la sostenibilidad del sistema.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

TABLA 2. Criterios generales de diseño para el proceso de extracción química de quitosano a partir de cáscaras de camarón, incluyendo tipo de proceso, etapas unitarias y condiciones operativas

Ítem de diseño	Criterio adoptado
Tipo de proceso	Batch / semi-batch
Naturaleza del proceso	Secuencial sólido–líquido con etapas multifase
Etapas del proceso	Desmineralización, desproteinización, desacetilación
Agente de desmineralización	Ácido clorhídrico (HCl) 1M [13]
Agente de desproteinización	Hidróxido de sodio (NaOH) 3 % p/p
Condición de desacetilación	Hidrólisis alcalina a alta temperatura y concentración de (NaOH) 40 % p/p [14]
Separación sólido–líquido	Filtración y lavado entre etapas
Control de materia prima	Composición homogénea y libre de contaminantes externos
Gestión del agua	Neutralización y reúso de efluentes en lavados no críticos

La naturaleza secuencial y multifase de la extracción química (sólido-líquido) requiere separación (filtración y lavado) entre las etapas de desmineralización, desproteinización y desacetilación. El proceso batch permite controlar rigurosamente las condiciones de reacción en cada lote, lo cual es esencial para alcanzar un alto grado de desacetilación (GDA) y facilitar la gestión de efluentes por separado [11].

TABLA 3. Parámetros técnicos y metas operativas del proceso de producción de quitosano

Criterio	Meta Operativa	Relevancia Técnica
GDA	> 80 %	Determina la funcionalidad y solubilidad del quitosano.
Rendimiento	> 11 %	Asegura la viabilidad económica del proceso.
Pureza (Cenizas)	< 1,0 %	Cumplimiento con estándares de grado industrial y alimentario.
Consumo de Energía	Optimización de la temperatura de desproteinización (≈ 65 °C)	Reducción de los costos operativos y de la huella de carbono [15].

Parámetros de diseño del proceso

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

TABLA 4. Condiciones de diseño para la desmineralización, desproteinización y desacetilación de las cáscaras de camarón.

Etapa	Parámetro	Valor de diseño	Justificación
Desmineralización	Reactivo y concentración	HCl 0,5-1,0 M	Permite la disolución efectiva del $CaCO_3$ con menor riesgo de hidrólisis de la quitina o de daños al equipo, manteniendo la circularidad [16].
	Temperatura de operación	25-30 °C	Operación a temperatura ambiente para ahorro energético, ya que la reacción es rápida y eficiente a bajas temperaturas.
	Tiempo de reacción	30— 60 minutos	Tiempo suficiente para la eliminación completa del $CaCO_3$ sin requerir condiciones extremas [13].
	Relación sólido–líquido	1:10— 1:20 (p/v)	Asegura un contacto íntimo del ácido con el sólido y minimiza el volumen de efluente [17].
Desproteinización	Reactivo y concentración	NaOH 1,0- 2,0 M	Concentración óptima para hidrolizar la matriz proteica y solubilizar pigmentos [16].
	Temperatura de operación	65-90 °C	Las temperaturas elevadas aceleran la hidrólisis de las proteínas. Se prioriza el intervalo de 65—80 °C para reducir el consumo de energía si se mantiene la eficiencia de eliminación [15].
	Tiempo de reacción	1— 3 horas	Tiempo necesario para asegurar la máxima eliminación de proteínas sin degradación significativa de la quitina [18].
Desacetilación	Reactivo y c concentración	NaOH al 40 % —50 % (p/v)	Se requiere una alta concentración de álcali para la hidrólisis del grupo acetamido a glucosamina, esencial para el GDA [19].
	Temperatura de operación	90 °C—110 °C	Condiciones severas, preferiblemente a reflujo (100 °C), para lograr un GDA alto (> 80 %) [13].
	Tiempo de reacción	3—6 horas	Los tiempos más largos bajo estas condiciones promueven un mayor GDA [20].
Producto Final	Rendimiento de quitosano	10 % — 20 % (p/p de cáscara seca)	Resultado esperado de la optimización de las tres etapas de extracción [16].
	Grado de desacetilación (GDA)	80 % — 95 %	Meta de calidad para aplicaciones de alto valor [21].

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

Reactivos

Los reactivos se seleccionaron considerando la calidad esperada del quitosano y la viabilidad económica de la operación. Se priorizaron grados comerciales con una relación favorable entre costo y desempeño, siempre que cumplieran los requisitos de pureza del producto.

TABLA 5. Especificaciones y precios de referencia del ácido clorhídrico (HCl) y el hidróxido de sodio (NaOH).

Reactivo	Ácido Clorhídrico (HCl)	Hidróxido de Sodio (NaOH)
Función principal	Desmineralización (eliminación de $CaCO_3$)	Desproteinización y desacetilación (conversión de quitina a quitosano).
Nombre comercial / Grado	Ácido muriático de grado técnico industrial. Alternativa: grado alimentario	Soda cáustica (escamas perlas) de grado técnico industrial. Alternativa: grado farmacopea (USP/EP).
Pureza mínima recomendada	32 % —37 % (líquido concentrado)	≥ 98,5 % (sólido, para desacetilación).
Especificaciones técnicas	Solución acuosa con baja concentración de metales pesados. Densidad ≈ 1.18 g/mL al 37 %.	Escamas o perlas totalmente solubles en agua y con bajo contenido de carbonato de sodio.
Rango de Precio Comercial (USD/ unidad)	≈ 0,30–0,70 USD/L (grado industrial, a granel)	≈ 0,50–1,20 USD/kg (grado industrial, a granel).

TABLA 6. Comparación de los procesos lineal y circular: gestión de efluentes, uso de reactivos y agua e integración energética.

Aspecto	Proceso lineal	Proceso circular (este estudio)
Tratamiento de efluentes líquidos	No considerado	Tratamiento fisicoquímico para reutilización externa (riego).
Reutilización interna de agua	No	Parcial (fuera del límite del proceso, vía riego).
Uso de reactivos ácido/ alcalino	Una sola pasada; disposición posterior	Regeneración parcial de NaOH.
Desmineralización	$CaCl_2$(aq) no aprovechado	$CaCl_2$(aq) (fuera del alcance del estudio).
Desproteinización	Efluente alcalino enviado a disposición	Efluente tratado para reducción de carga contaminante.
Integración energética	No considerada	Oportunidades identificadas: recuperación de calor y eliminación de secado completo.
Consumo de agua fresca	Alto	Reducido mediante tratamiento y reutilización externa.
Nivel de circularidad	Bajo	Parcial (agua como principal vector de circularidad).

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

RESULTADOS

Proceso lineal

La configuración del proceso lineal no considera la reutilización de agua y reactivos químicos. Los efluentes alcalinos y ácidos son puestos a disposición después de cumplir su función sin regeneración. Durante la etapa de desmineralización, el carbonato de calcio reacciona con ácido clorhídrico produciendo una corriente acuosa de cloruro de calcio, que no se recupera ni se valoriza, y dióxido de carbono liberado a la fase gaseosa. De manera similar, el efluente generado durante la etapa de desproteinización, que contiene proteínas solubilizadas y álcalis residuales, se envía a disposición final sin mayor aprovechamiento. El agua de proceso no se trata ni se recircula, y todos los efluentes líquidos se descargan después de su uso.

Proceso circular

En la configuración del proceso circular evaluada en este estudio, los efluentes líquidos generados durante el proceso de extracción son tratados para cumplir con los estándares de calidad del agua de riego, lo que permite la reutilización del agua fuera de los límites del sistema. La recuperación o regeneración de sales de calcio ($CaCl_2$ o $CaCO_3$) y corrientes ricas en proteínas no se consideró dentro del alcance del presente trabajo. Sin embargo, estas corrientes representan posibles vías de valorización que podrían integrarse en futuras mejoras de procesos, como la recuperación de sales de calcio, la precipitación de proteínas o la digestión anaeróbica.

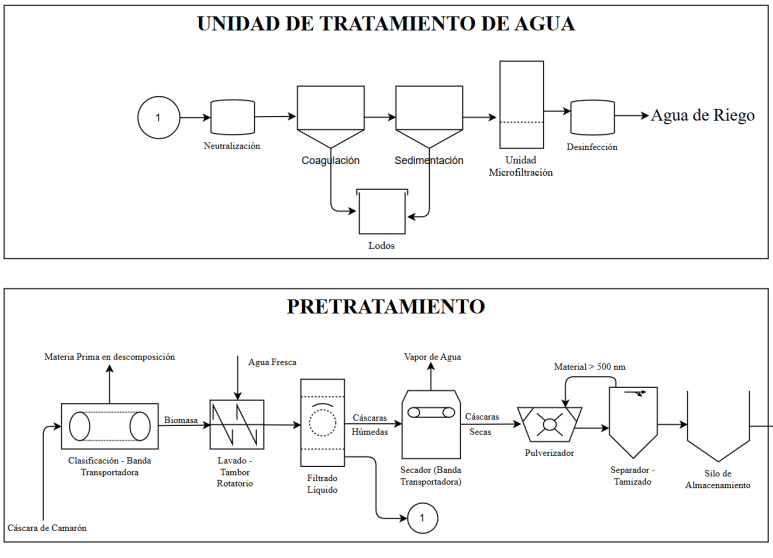


FIGURA 1. Diagrama de flujo del proceso circular para la unidad de tratamiento de agua y pretratamiento. La materia prima (cáscara de camarón) es limpiada, filtrada, secada y pulverizada antes del proceso de desmineralización.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

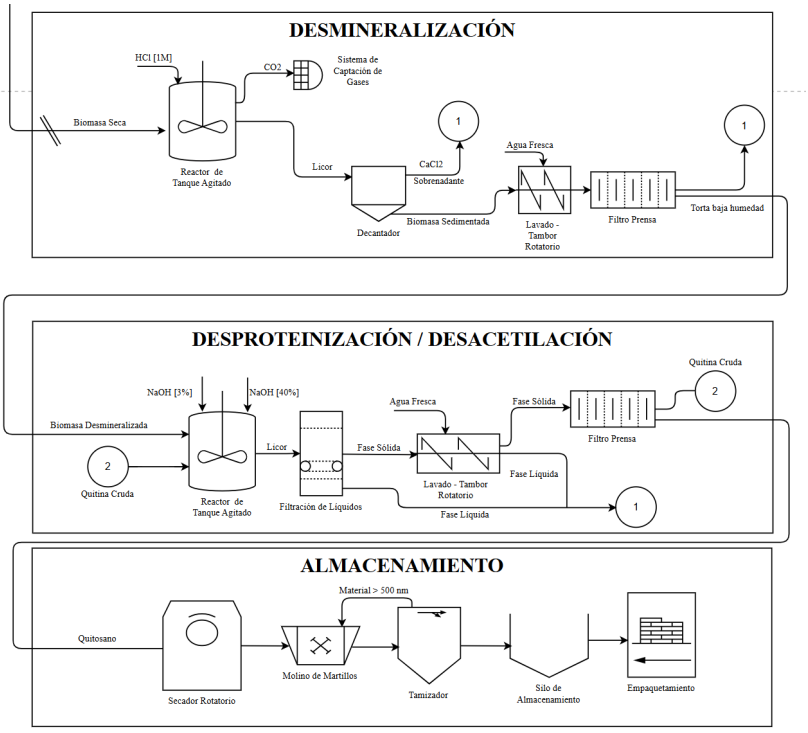


FIGURA 2. Diagrama de flujo del proceso circular para las unidades de desmineralización, desproteinización/ desacetilación y almacenaje. La biomasa pretratada es convertida en quitosano a través de un tratamiento ácido, seguido de una alcalinización, lavado y secado. El producto final es pulverizado y empaquetado.

Balance de masa

El balance de masa presentado corresponde a la producción diaria de quitosano a partir de cáscaras de camarón, considerando una alimentación de 4000 kg/día. Los flujos de sólidos se expresan en kg/día y los de agua y reactivos en L/día, sirviendo como base para el análisis y dimensionamiento del proceso.

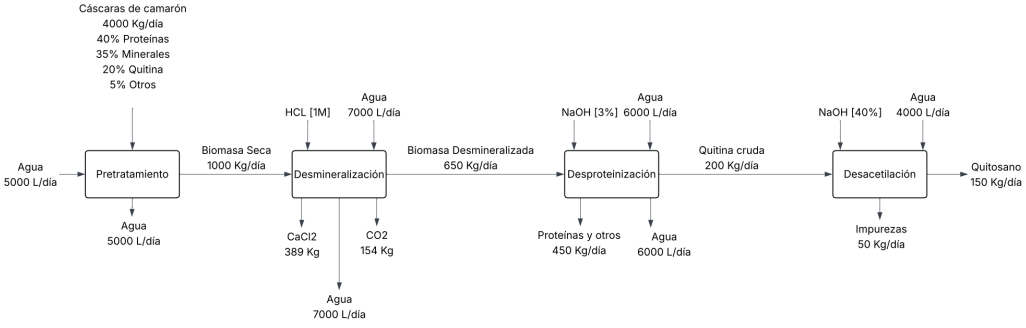


FIGURA 3. Balance de masa del proceso de extracción de quitosano a partir de cáscaras de camarón, considerando una alimentación de 4000 kg/día de materia prima en base húmeda.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

Las cáscaras de camarón constituyen una materia prima abundante y de bajo costo [4], con una composición rica en proteínas (40 %), minerales (35 %), quitina (20 %) y otros compuestos orgánicos (5 %), lo que las convierte en una fuente adecuada para la obtención de quitosano. El proceso propuesto se desarrolla de manera secuencial e incluye las etapas de pretratamiento, desmineralización, desproteinización y desacetilación, operando bajo condiciones cercanas a la presión atmosférica y temperaturas moderadas, similares a las reportadas en la literatura para este tipo de procesos [13].

En la etapa de pretratamiento, las cáscaras se someten a operaciones de lavado y acondicionamiento con agua, con el objetivo de eliminar impurezas superficiales y restos orgánicos solubles. Posteriormente, la desmineralización se lleva a cabo mediante el uso de ácido clorhídrico 1,0 M, permitiendo la remoción de los minerales presentes, principalmente carbonato de calcio, con la formación de cloruro de calcio y dióxido de carbono como subproductos. Esta etapa reduce la masa de la biomasa sólida en base seca (BS) de 1000 kg a 650 kg, concentrando la fracción orgánica.

La biomasa desmineralizada es sometida a un proceso de desproteinización utilizando hidróxido de sodio al 3 %, con el fin de solubilizar y eliminar las proteínas y otros compuestos no deseados, obteniéndose quitina cruda como producto sólido intermedio. Finalmente, la quitina es transformada en quitosano mediante una etapa de desacetilación empleando una solución concentrada de NaOH al 40 %, alcanzando una producción final de 150 kg de quitosano, con una pureza cercana al 90 %.

Un aspecto crítico de este diseño es la elevada demanda hídrica necesaria para garantizar la neutralidad y pureza del biopolímero. Se estima que el proceso total requiere aproximadamente 22 000 L de agua para tratar un lote inicial de 4000 kg de cáscara. Específicamente, existe un incremento en la relación agua/sólido (ratio de lavado) a medida que avanza la purificación, pasando de un lavado simple en el pretratamiento a un lavado intensivo de 20:1 en la etapa final de desacetilación.

Análisis económico

El diseño propuesto para la producción de quitosano proyecta una capacidad de procesamiento de 960 toneladas anuales de cáscara fresca de camarón, representando aproximadamente un 0,30 % de los desperdicios de la exportación de camarón en Ecuador. La inversión de capital fijo se estima sobre los 440 179 USD para el proceso circular frente a 548 930 USD de inversión sobre un proceso lineal. El capital de trabajo refleja que el proceso de extracción química convencional representa 99 % únicamente en materia prima.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

TABLA 7. Comparación de inversión de capital (CAPEX) y costos operativos (OPEX) para los procesos lineal y circular de producción de quitosano a partir de cáscaras de camarón.

Capital fijo (CAPEX)		
Proceso	**Lineal**	**Circular**
ISBL	301 610 USD	241 853 USD
OSBL	120 644 USD	96 742 USD
Ingeniería	63 339 USD	50 790 USD
Imprevistos	63 339 USD	50 790 USD
Total	**548 932 USD**	**440 175 USD**

Costos operativos variables		
Proceso	**Lineal**	**Circular**
Materia prima / mes	108 700 USD	69 000 USD
Electricidad / mes	960 USD	600 USD
Total / año	**1 315 920 USD**	**835 200 USD**

COP Fijo		
Proceso	**Lineal**	**Circular**
Labor de operación (operarios)	22 800 USD	22 800 USD
Supervisor	12 000 USD	12 000 USD
Salariales directos	12 000 USD	12 000 USD
Mantenimiento	9 049 USD	7 256 USD
Impuestos	3 017 USD	2 419 USD
Alquiler de terreno	4 223 USD	3 386 USD
Gastos generales	30 420 USD	30 420 USD
Total	**93 509 USD**	**90 281 USD**

CAPEX (Capital Expenditure): inversión de capital fijo total requerida para la implementación de la planta.
ISBL (Inside Battery Limits): costos de equipos y unidades de proceso principales dentro de los límites de la planta.
OSBL (Outside Battery Limits): costos de servicios auxiliares e infraestructura (utilities, almacenamiento, tratamiento de efluentes).
COP (Cost of Production): costos de producción totales.
COP Variable: costos asociados a materias primas, energía y consumibles.
COP Fijo: costos asociados a mano de obra, mantenimiento y gastos generales.

En base al balance de materia (Figura 3), el procesamiento de una tonelada métrica de camarón en base seca en una configuración lineal resulta en un costo estimado de consumo de productos químicos y agua de aproximadamente 5 435 USD por lote (Tabla 10). Considerando los rendimientos generales típicos reportados en la literatura (Tabla 1), esto corresponde a un costo de producción de aproximadamente 35 USD por kilogramo de quitosano.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

La implementación de estrategias de circularidad, específicamente la recuperación parcial de hidróxido de sodio [11] permite reducir el consumo de reactivos en aproximadamente un 36 % (Tabla 11). Como resultado, el costo unitario de producción disminuye a alrededor de 23 USD/kg en la configuración circular, evidenciando el impacto directo de la recuperación de recursos sobre la eficiencia económica del proceso.

Análisis de viabilidad económica

El análisis económico de la planta de producción de quitosano se realizó para un horizonte de 10 años, considerando una producción anual de 36 000 kg y un precio de venta de 58 USD/kg [8], lo que genera ingresos anuales de 2 088 000 USD en ambos escenarios. Se evaluaron dos configuraciones de proceso: un proceso lineal y un proceso circular, comparando inversión de capital, costos operativos y desempeño financiero mediante flujos de caja y el Valor Actual Neto (VAN).

TABLA 8. Indicadores económicos para los procesos lineal y circular de producción de quitosano, incluyendo ingresos, costos operativos y flujo neto anual

Proceso	Lineal	Circular
Ítem	Observaciones	
Precios de Venta	58 USD	58 USD
Ventas Anuales	2 088 000 USD	2 088 000 USD
COP Variable	1 315 920 USD	835 200 USD
COP Fijo	93 509 USD	90 281 USD
Flujo Neto Anual	678 571 USD	1 162 519 USD

Nota: El análisis de sensibilidad posterior consideró una variación del precio de venta en 20 %.

Análisis de sensibilidad

Con el objetivo de evaluar la robustez del modelo económico, se realizó un análisis de sensibilidad considerando variaciones en el precio de venta del quitosano, una de las variables más influyentes en los ingresos del sistema. Se analizó un escenario con una reducción del 20 % en el precio de venta, pasando de 58 USD/kg (Figura 4) a 46,4 USD/kg (Figura 5), manteniendo constantes los demás parámetros del modelo.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

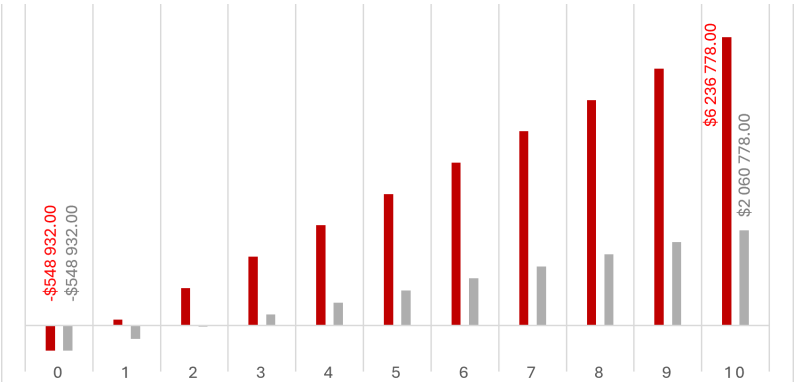


FIGURA 4. Flujo de caja acumulado del proceso lineal con un precio de venta de 58 USD/kg (escenario base) y de 46,4 USD/kg (escenario con una reducción del 20 %).

Los resultados muestran que esta variación tiene un impacto directo sobre los flujos de caja acumulados en ambas configuraciones de proceso. En el caso del proceso lineal (Figura 4), la reducción en el precio de venta disminuye significativamente el valor acumulado del proyecto a lo largo del horizonte de evaluación, evidenciando una alta sensibilidad del desempeño económico frente a condiciones de mercado adversas.

Por su parte, el proceso circular (Figura 5), si bien también experimenta una reducción en sus flujos de caja, mantiene un crecimiento sostenido y valores acumulados significativamente superiores en comparación con el proceso lineal bajo el mismo escenario de sensibilidad. Este comportamiento se atribuye principalmente a la reducción de los costos operativos, en particular al menor consumo de hidróxido de sodio, lo que permite amortiguar parcialmente el impacto de la disminución en los ingresos.

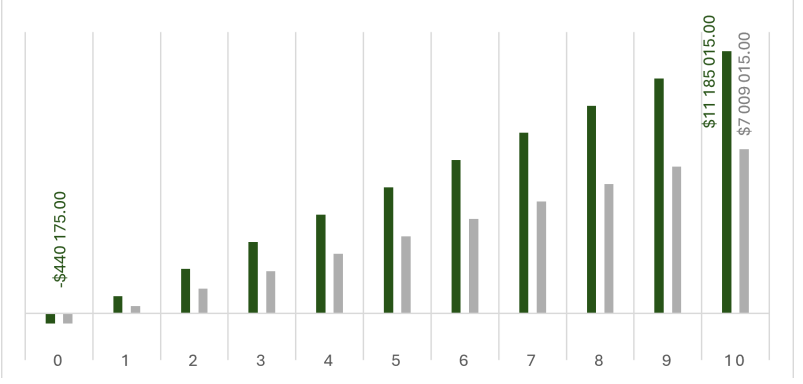


FIGURA 5. Flujo de caja acumulado del proceso circular con un precio de venta de 58 USD/kg (escenario base) y de 46,4 USD/kg (escenario con una reducción del 20 %).

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

Evaluación del Valor Actual Neto y Tasa Interna de Retorno

La Tabla 9 presenta los resultados del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para las configuraciones de proceso lineal y circular, evaluadas bajo un horizonte de 10 años y una tasa de descuento del 10 %, en línea con metodologías estándar de evaluación técnico-económica en procesos químicos y biotecnológicos [22], tanto en el escenario base como en un escenario conservador con una reducción del 20 % en el precio de venta del quitosano.

TABLA 9. Evaluación del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para los procesos lineal y circular bajo escenario base y escenario conservador, considerando un horizonte de 10 años y una tasa de descuento del 10 %.

Indicador económico	Lineal	Lineal (-20%)	Circular	Circular (-20%)
Flujo neto anual (USD/año)	678 571	260 971	1 162 519	744 919
CAPEX inicial (USD)	548 932		440 175	
Factor de anualidad	6,14		6,14	
Valor presente de flujos (USD)	4 169 525	1 603 553	7 143 176	4 577 204
Tasa interna de retorno (%)	125	43	240	169
VAN (10 años, 10 %) (USD)	3 620 593	1 054 621	6 703 001	4 137 029

TABLA 10. Costos asociados a la producción por lote de una tonelada en base seca

Etapa -Reactivo	Consumo por lote	Precio unitario (USD)	Costo parcial (USD)	Comentario
Desmineralización Ácido clorhídrico (HCl, 32 % p/p)	982 L	1.50 / L	1,473	Carga de sólidos 1:10 (kg/L)
Lavados Agua de proceso	5 – 10 m^3	0.50 – 1.00 / m^3	2.5 – 10	Puede reducirse parcialmente en esquema circular
Desproteinización Hidróxido de sodio (NaOH sólido)	200 kg	2.40 / kg	480	Solubilización de proteínas
Lavados intermedios Agua de proceso	10 – 15 m^3	0.50 – 1.00 / m^3	5 – 15	Neutralización
Desacetilación Hidróxido de sodio (NaOH sólido)	1430 kg	2.40 / kg	3,432	Alta concentración (40–50 %)
Lavados finales Agua de proceso	20 – 25 m^3	0.50 – 1.00 / m^3	10 – 25	Ajuste de pH
Total Estimado	—	—	**5,435 USD**	Sin recuperación de reactivos

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

TABLA 11. Costos asociados a materia prima en esquema circular

Escenario	Costo (USD / t seca)
Proceso lineal	5,435
Circular (50 % NaOH)	3,450
Reducción	36 %

Nota: Recuperación de NaOH en un 50%

En el escenario base, ambos procesos presentan VAN positivos, lo que indica viabilidad económica bajo las condiciones evaluadas. No obstante, el proceso circular muestra un desempeño significativamente superior, alcanzando un VAN de aproximadamente 6,70 millones de USD, en comparación con 3,62 millones de USD para el proceso lineal. Esta diferencia, cercana a 3,1 millones de USD, se explica principalmente por el mayor flujo de caja neto anual del esquema circular, resultado de la reducción en los costos operativos asociados al consumo de reactivos.

Al considerar el escenario conservador, se observa una disminución en los valores de VAN para ambas configuraciones, reflejando la alta sensibilidad del modelo económico frente al precio de venta del producto. En este caso, el VAN del proceso lineal se reduce a aproximadamente 1,05 millones de USD, mientras que el proceso circular mantiene un valor de alrededor de 4,14 millones de USD. A pesar de esta reducción, ambos procesos continúan siendo económicamente viables, destacándose nuevamente la mayor resiliencia del esquema circular frente a condiciones de mercado menos favorables.

En cuanto a la TIR, los valores obtenidos en el escenario base (125 % para el proceso lineal y 240 % para el circular) reflejan una alta rentabilidad asociada a la combinación de bajos requerimientos de inversión inicial y elevados flujos de caja operativos. Sin embargo, estos valores deben interpretarse con cautela, ya que la TIR es altamente sensible a variaciones en los flujos de caja. En el escenario conservador, la reducción en los ingresos conduce a una disminución significativa en la TIR, particularmente en el proceso lineal, lo que confirma la dependencia de este indicador respecto a los supuestos económicos adoptados.

En conjunto, los resultados evidencian que, si bien ambos procesos son económicamente viables bajo los escenarios analizados, la integración de estrategias de economía circular no solo mejora la rentabilidad en condiciones base, sino que también fortalece la robustez del sistema frente a incertidumbre en variables clave como el precio de venta del producto.

DISCUSIÓN

El presente estudio indica que, para una capacidad de producción de 36 toneladas anuales de quitosano, el proceso evaluado requiere una inversión inicial de aproximadamente 548 932 USD en su configuración lineal y 440 175 USD en la alternativa circular. Bajo estas condiciones, y considerando un horizonte de evaluación de 10 años con una tasa de

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

descuento del 10 %, el proceso lineal alcanza un Valor Actual Neto (VAN) cercano a 3,62 millones de USD, mientras que la implementación de un esquema circular incrementa este indicador hasta aproximadamente 6,70 millones de USD.

El análisis de flujo de caja muestra que ambos procesos recuperan la inversión en etapas tempranas de operación (Figuras 3 y 4). Sin embargo, la configuración circular presenta un desempeño económico superior, evidenciado por un crecimiento más acelerado del flujo de caja acumulado. Esta mejora se atribuye principalmente a la reducción de los costos operativos, particularmente en la etapa de desacetilación, donde la recuperación parcial de hidróxido de sodio disminuye de forma significativa el consumo de reactivos.

En términos de costos unitarios, la producción de quitosano se estima en aproximadamente 35 USD/kg para el proceso lineal, valor que se reduce a cerca de 23 USD/kg al incorporar estrategias de circularidad. Esta diferencia evidencia el impacto directo de la recuperación de recursos sobre la eficiencia económica del sistema, especialmente en procesos intensivos en consumo de insumos químicos.

Al comparar estos resultados con estudios reportados en la literatura, se observan diferencias relevantes. En Ecuador, para una capacidad de producción de 110 t/año, se reportan costos de producción cercanos a 8,38 USD/kg, mientras que otros estudios indican valores entre 8,4 y 12 USD/kg dependiendo de la escala y el contexto operativo [8]. Los costos obtenidos en el presente trabajo son superiores, lo cual puede atribuirse a diferencias en los supuestos de diseño, consumo de reactivos y escala del proceso. No obstante, a pesar de estos mayores costos unitarios, los resultados económicos muestran VAN positivos, lo que sugiere que la viabilidad del proceso está fuertemente influenciada por el precio de mercado del quitosano y por la optimización del uso de insumos.

En este sentido, el análisis de sensibilidad confirma que la rentabilidad del sistema es altamente dependiente del precio de venta del producto. Bajo un escenario conservador, considerando una reducción del 20 % en el precio del quitosano, el VAN del proceso lineal disminuye a aproximadamente 1,05 millones de USD, mientras que el proceso circular mantiene un valor cercano a 4,14 millones de USD. Estos resultados evidencian que, si bien ambos procesos siguen siendo económicamente viables, la configuración circular presenta una mayor resiliencia frente a condiciones de mercado adversas, debido a su menor dependencia de insumos químicos [8].

Finalmente, alternativas tecnológicas emergentes, como la desacetilación enzimática o el uso de solventes eutécticos profundos naturales (NADES), han sido propuestas en la literatura como rutas potencialmente más sostenibles. La desacetilación enzimática se ha identificado como una alternativa con potencial en términos de sostenibilidad; no obstante, su aplicación industrial aún es incipiente debido a limitaciones técnicas y económicas que afectan su viabilidad a gran escala [10, 14, 23].

CONCLUSIONES

A partir del análisis técnico-económico realizado, se concluye que la producción de quitosano a partir de residuos de cáscara de camarón es económicamente viable bajo

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

las condiciones evaluadas. Para una capacidad de producción de 36 toneladas anuales, ambos esquemas de proceso presentan valores positivos de Valor Actual Neto (VAN) en un horizonte de 10 años, lo que indica la generación de valor económico del proyecto.

La incorporación de estrategias de economía circular, particularmente la recuperación parcial de hidróxido de sodio permite reducir de manera significativa los costos operativos del proceso, incrementando el flujo de caja neto anual y mejorando los indicadores económicos. En este contexto, el proceso circular alcanza un VAN considerablemente mayor en comparación con la configuración lineal, lo que evidencia el impacto positivo de la recuperación de recursos en la rentabilidad del sistema.

El análisis de sensibilidad demuestra que la viabilidad económica del proyecto está fuertemente influenciada por el precio de venta del quitosano. Bajo un escenario conservador con una reducción del 20 % en el precio del producto, ambos procesos mantienen VAN positivos; sin embargo, el esquema circular presenta una menor reducción relativa en su desempeño económico, lo que indica una mayor resiliencia frente a condiciones de mercado adversas.

Si bien los valores de la Tasa Interna de Retorno (TIR) obtenidos en el escenario base son elevados, estos deben interpretarse con cautela debido a su alta sensibilidad a los flujos de caja y a los supuestos del modelo. En este sentido, el uso del VAN como indicador principal permite una evaluación más robusta de la viabilidad económica del proyecto.

Finalmente, los resultados obtenidos resaltan que, más allá de la escala de producción, el diseño del proceso y la implementación de estrategias de circularidad desempeñan un papel determinante en la viabilidad económica. En particular, la valorización de residuos y la optimización en el uso de insumos químicos no solo contribuyen a mejorar la rentabilidad, sino también a fortalecer la sostenibilidad y la resiliencia de los sistemas productivos en el sector de biopolímeros.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se desarrolló durante el curso "Diseño e Ingeniería Circular" del programa de maestría en Ingeniería Circular de la Universidad San Francisco de Quito USFQ.

Los autores agradecen al director del programa y a los profesores de la Maestría en Ingeniería Circular por su guía académica, discusión crítica y apoyo en el desarrollo de este estudio, los cuales fueron fundamentales para la consolidación del enfoque técnico y conceptual del trabajo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Paul Quezada: conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, evaluación técnico-económica y redacción de borradores originales.

Kevin Haro: conceptualización y redacción de borradores originales.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

Augustina Cepeda: evaluación técnico-económica y redacción de borradores originales.

Samaela Montero: evaluación técnico-económica y redacción de borradores originales.

Alexis Vaca: conceptualización y redacción de borradores originales.

José Álvarez-Barreto: revisión-edición.

DECLARACIÓN DE USO DE TECNOLOGÍAS IA GENERATIVAS Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

En la preparación del manuscrito se emplearon herramientas digitales de apoyo para la revisión bibliográfica, gestión de referencias, revisión del estilo, claridad del lenguaje, corrección lingüística y elaboración de diagramas y representaciones de procesos. Específicamente, se utilizó ChatGPT (GPT-5.6 Luna) como herramienta de apoyo para la revisión bibliográfica, así como para la revisión del estilo, claridad y corrección lingüística del manuscrito; Mendeley para la gestión y organización de las referencias bibliográficas; Visual Paradigm Online para la elaboración del diagrama de flujo del proceso; y Lucidchart para la visualización de los procesos relacionados con los balances de masa.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

No se generaron nuevos datos en este estudio.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses relacionados con el presente trabajo.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

aci avances en ciencias e ingenierías

REFERENCIAS

[1] Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances, 3*(7). https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782

[2] Hemachandra, S., Hadjikakou, M., & Pettigrew, S. (2024). A scoping review of food packaging life cycle assessments that account for packaging-related food waste. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *29*, 1899–1915. https://doi.org/10.1007/s11367-024-02349-z

[3] Cámara Nacional de Acuacultura. (2025, 31 de agosto). Camarón: reporte de exportaciones ecuatorianas totales. https://www.cna-ecuador.com/estadisticas/

[4] Dissanayake, K. K., Kurniawan, T. A., Sarangi, P. K., AlSultan, G. A., Goh, H. H., Wong, H. Y., Onn, C. W., Tharikulislam, M., Aziz, F., Othman, M. H. D., Anouzla, A., Ali, I., Khan, M. I., & Zhang, D. (2026). Upcycling marine food waste into biodegradable food packaging: A sustainable approach toward zero-waste society and biocircular economy. *Biomass and Bioenergy*, *208*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108837

[5] Wani, A. K., Akhtar, N., Mir, T. ul G., Rahayu, F., Suhara, C., Anjli, A., Chopra, C., Singh, R., Prakash, A., El Messaoudi, N., Fernandes, C. D., Ferreira, L. F. R., Rather, R. A., & Américo-Pinheiro, J. H. P. (2024). Eco-friendly and safe alternatives for the valorization of shrimp farming waste. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(27), 38960–38989. https://doi.org/10.1007/s11356-023-27819-z

[6] Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science*, *31*(7), 603–632. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001

[7] Fan, Y., Qiao, Q., Fang, L., & Yao, Y. (2017). Emergy analysis on industrial symbiosis of an industrial park: A case study of Hefei economic and technological development area. *Journal of Cleaner Production*, *141*, 791–798. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.159

[8] Riofrio, A., Alcivar, T., & Baykara, H. (2021). Environmental and economic viability of chitosan production in Guayas-Ecuador: A robust investment and life cycle analysis. *ACS Omega*, *6*(36), 23038–23051. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01672

[9] Lertsutthiwong, P., How, N. C., Chandrkrachang, S., & Stevens, W. F. (2002). Effect of chemical treatment on the characteristics of shrimp chitosan. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, *12*(1), 11–18. https://jmmm.material.chula.ac.th/index.php/jmmm/article/view/1273

[10] Muñoz-Seijas, N., Fernandes, H., Soto-Beltrán, F., Lolo, M., Domínguez, J. M., & Salgado, J. M. (2025). Natural deep eutectic solvents: A sustainable approach for extracting protein and chitin from *Tenebrio molitor* beetles. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *104*. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104104

[11] Anwar, M., Anggraeni, A. S., & Al Amin, M. H. (2017). Comparison of green method for chitin deacetylation. *AIP Conference Proceedings*, *1823*(1). https://doi.org/10.1063/1.4978144

[12] Toliba, A., Rabie, M., & El-Araby, G. (2014). Extending the shelf-life of cold stored strawberry by chitosan and carnauba coatings. *Zagazig Journal of Agricultural Research*, *41(5)*, 1067–1076.

[13] Salman, R. A., & Zedain, N. K. (2025). Chitosan, sources and extraction: A review. *Kufa Journal of Engineering*, *16*(4), 615–631. https://doi.org/10.30572/2018/kje/160436

[14] Aoun, R. Ben, Mhamdi, R., Freitas, F., Abdallah, M., Concórdio-Reis, P., Mejri, A., Corvo, M., Hamzaoui, A. H., Amor, M. Ben, Conti, B., Habibi, M., Athanassiou, C., Rumbos, C. I., Adamaki-Sotiraki, C., & Trabelsi, N. (2026). Eco-friendly chitosan production from diverse biowastes: Deep eutectic solvents outperform conventional methods. *International Journal of Biological Macromolecules*, *337*. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.149511

[15] Hosney, A., Ullah, S., & Barčauskaitė, K. (2022). A review of the chemical extraction of chitosan from shrimp wastes and prediction of factors affecting chitosan yield by using an artificial neural network. *Marine Drugs*, *20*(11), 675. https://doi.org/10.3390/md20110675

[16] Puvvada, Y. S., Vankayalapati, S., & Sukhavasi, S. (2012). Extraction of chitin from chitosan from exoskeleton of shrimp for application in the pharmaceutical industry. *International Current Pharmaceutical Journal*, *1*(9), 258–263. https://doi.org/10.3329/icpj.v1i9.11616

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158

[17] Khanafari, A., Marandi, R., Marandi, R., & Sanatei, S. (2008). Recovery of chitin and chitosan from shrimp waste by chemical and microbial methods. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, *5*(1), 19–24.

[18] Yu, D., Puhar, J., Mukherjee, S., Oślovnik, T., Dutta, J., Vujanović, A., & Ye, F. (2026). Sustainable extraction of chitosan from blue crabs (*Callinectes sapidus*) by green solvents. *Bioresource Technology*, *441*, Article 133595. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133595

[19] Vázquez-Aldana, M., Sixto-Berrocal, A. M., Arcos-Casarrubias, J. A., Martínez-Trujillo, M. A., & Cruz-Díaz, M. R. (2025). Biological and chemical synergy in chitin and chitosan production: The role of process sequencing in shrimp shell waste treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, *306*, Article 141247. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141247

[20] Chik, C. E. N. C. E., Kamaruzzan, A. S., Rahim, A. I. A., Lananan, F., Endut, A., Aslamyah, S., & Kasan, N. A. (2022). Extraction and characterization of *Litopenaeus vannamei*'s shell as potential sources of chitosan biopolymers. *Journal of Renewable Materials*, *11*(3), 1181–1197. https://doi.org/10.32604/jrm.2023.022755

[21] Kumirska, J., Weinhold, M. X., Thöming, J., & Stepnowski, P. (2011). Biomedical activity of chitin/chitosan based materials: Influence of physicochemical properties apart from molecular weight and degree of N-acetylation. *Polymers*, *3*(4), 1875–1901. https://doi.org/10.3390/polym3041875

[22] Towler, G., & Sinnott, R. (2013). Capital cost estimating. In *Chemical engineering design* (pp. 307–354). https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096659-5.00007-9

[23] Harmsen, R. A. G., Tuveng, T. R., Antonsen, S. G., Eijsink, V. G. H., & Sørlie, M. (2019). Can we make chitosan by enzymatic deacetylation of chitin? *Molecules*, *24*(21), 3862. https://doi.org/10.3390/molecules24213862

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4158