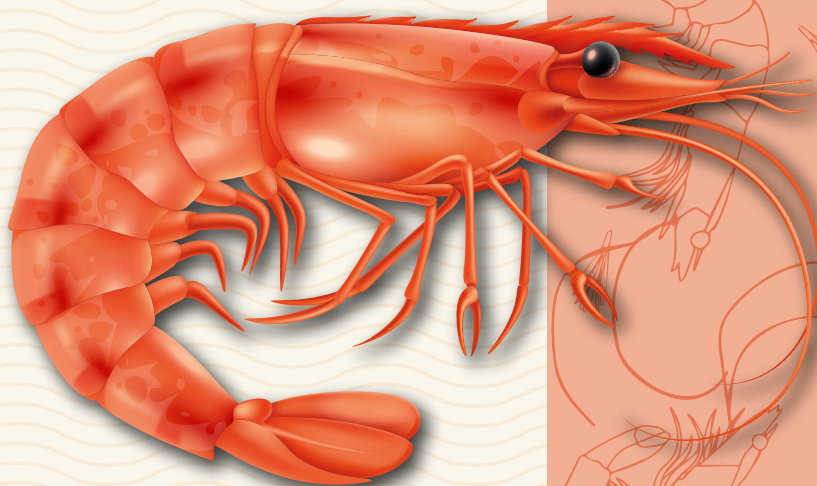


Biorrefinación sostenible del camarón: desarrollos desde la Ingeniería de Procesos Asistida por Computador



Biorrefinación sostenible del camarón: desarrollos desde la Ingeniería de Procesos Asistida por Computador

Ángel Darío González Delgado
Kariana Andrea Moreno Sader
Jairo David Martínez Consuegra

González-Delgado, Ángel Darío
Biorrefinación sostenible del camarón : desarrollos desde la ingeniería de procesos asistida por computador / Ángel Darío González-Delgado, Kariana Andrea Moreno-Sader, Jairo David Martínez-Consuegra. Bogotá : Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO, 2022.

ISBN: 978-958-763-558-4 (Impreso)

ISBN: 978-958-763-559-1 (Digital)

292p. : il, tab, fot.

1.Camarones -- Producción -- Colombia 2.Ingeniería de la producción -- Colombia 3.Desarrollo sostenible -- Colombia 4.Impacto ambiental -- Colombia 5.Biorrefinerías -- Colombia i.Moreno-Sader, Kariana Andrea ii.Martínez-Consuegra, Jairo David.

CDD: 664.94 G65b BRGH

Registro Catálogo Uniminuto No. 104444

Archivo descargable en MARC a través del link: <https://tinyurl.com/bib104444>



Presidente del Consejo de Fundadores

P. Diego Jaramillo Cuartas, cjm

Rector General Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO

P. Harold Castilla Devoz, cjm

Vicerrectora General Académica

Stephanie Lavaux

Director de Investigaciones – PCIS

Tomás Durán Becerra

Subdirectora Centro Editorial – PCIS

Rocío del Pilar Montoya Chacón

Rector UNIMINUTO Sede Caribe

Liliana Naranjo Anillo

Vicerrector Académico UNIMINUTO

Sede Caribe

Jairo David Martínez Consuegra

Director de Investigación UNIMINUTO

Sede Caribe

Pablo Andrés Palencia Domínguez

Biorrefinación sostenible del camarón:
desarrollos desde la Ingeniería de Procesos
Asistida por Computador

Autores

Ángel Darío González-Delgado,
Kariana Andrea Moreno-Sader
Jairo David Martínez-Consuegra

Corrección de estilo

Miguel Fernando Niño Roa

Diseño y Diagramación

Mauricio Salamanca

ISBN digital: 978-958-763-559-1

ISBN impreso: 978-958-763-558-4

**Corporación Universitaria Minuto de Dios
- UNIMINUTO**

Calle 81 B # 72 B - 70

Bogotá D.C. - Colombia

Septiembre 2021

Esta publicación nace del proyecto de investigación titulado: “Desarrollo de una topología de biorrefinería para el aprovechamiento sostenible de los residuos del camarón y su impacto en el sector camaronicultor”, de los grupos de investigación Desarrollo Social y Gerencial del programa Administración de Empresas de la Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO y (NIPAC), Nanomateriales e Ingeniería de Procesos Asistida por Computador del programa de Ingeniería Química de la Universidad de Cartagena el cual fue financiado por la Corporación Universitaria Minuto de Dios - Sede UNIMINUTO Caribe.

© Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO. Todos los documentos publicados en *Biorrefinación sostenible del camarón: Desarrollos desde la Ingeniería de Procesos Asistida por Computador* fueron seleccionados de acuerdo con los criterios de calidad editorial establecidos en la Institución. El libro está protegido por el Registro de propiedad intelectual. Se autoriza su reproducción total o parcial en cualquier medio, incluido electrónico, con la condición de ser citada clara y completamente la fuente, siempre y cuando las copias no sean usadas para fines comerciales, tal como se precisa en la Licencia Creative Commons Atribución – No comercial – Sin Derivar que acoge UNIMINUTO.

Dedicatorias

A mi padre, Gregorio González Barrera. A la memoria de mi madre Carmenza Delgado Anaya, todos mis logros pasados, presentes y futuros, comenzaron con su apoyo.

ADGD

A mis padres, Oscar Moreno y Ada Sadler, por cultivar en mí amor, dedicación y empatía. A mi hermana Karolain Moreno por su dedicación. A mis profesores por las oportunidades brindadas, especialmente al profesor Ángel González.

KAMS

A mi esposa Irene por su amor y apoyo incondicional. A mis hijas María y Ana por ser mi fuente inagotable de energía.

JDMC

Contenido

Dedicatorias	5
Agradecimientos	13
Autores	15
Prólogo	17
Introducción	21
Resumen.....	27
Abstract	28
Capítulo I.	
Diagnóstico del sector camaronicultor en Colombia e introducción a las biorrefinerías	29
1.1. Quitina	35
1.2. Quitosano.....	39
1.3. Astaxantina	41
1.4. El concepto de biorrefinería.....	44
1.5. Ingeniería de Procesos Asistida por Computador como herramienta de diseño y evaluación de sostenibilidad de biorrefinerías	51
Referencias	53
Capítulo II.	
Desarrollo de una biorrefinería de camarón en la región Caribe colombiana mediante modelado y simulación de procesos	69
2.1 Modelos de coeficiente de actividad y ecuaciones de estado.....	75
2.1.1. Modelo de Wilson.....	75
2.1.2. Modelo NRTL (Non-Random Two-Liquid)	76

2.1.3. Modelo UNIQUAC (Universal QUAsi Chemical Equation)	78
2.1.4. Modelo UNIFAC	80
2.1.5. Ecuación de estado Redlich Kwong	81
2.1.6. Ecuación de estado Soave -Redlich-Kwong	82
2.1.7. Ecuación de estado Peng Robinson	83
2.2. Investigaciones recientes en modelado y simulación de bioprocesos y biorrefinerías asistida por computador.....	84
2.3. Descripción general del proceso modelado.....	86
2.3.1. Sección (i): Procesamiento de camarones.....	87
2.3.2. Sección (ii): Recuperación de quitina.....	88
2.3.3. Sección (iii): Producción de quitosano.....	89
2.3.4. Sección (iv): Recuperación de astaxantina.....	90
2.4. Simulación de la biorrefinería	94
2.4.1. Validación de las propiedades calculadas.....	102
2.4.2. Capacidad de producción, rendimiento de producción y eficiencia técnica	104
2.4.3. Análisis técnico de unidades de procesamiento	105
2.5. Conclusiones	109
Referencias	109

Capítulo III.

Evaluación económica y análisis de sensibilidad

técnico-económica de una biorrefinería de camarón	115
3.1. Tipos de costos y estimación	117
3.1.1. Inversión total de capital (TCI).....	118
3.1.2. Costos de Operación (OC).....	122
3.2. Análisis del punto de equilibrio	128
3.3. Eficiencia On-Stream en el punto de equilibrio	128
3.4. Indicadores de rentabilidad	129
3.4.1. Ganancia bruta (GP).....	129
3.4.2. Rentabilidad después de impuestos (PAT).....	129
3.4.3. Potenciales económicos (EP)	129
3.4.4. Flujo de caja acumulado (CCF).....	130
3.4.5. Período de Recuperación de la Inversión sin incluir depreciación (PBP).....	130
3.4.6. Período de recuperación de la inversión incluyendo la depreciación (DPBP).....	131
3.4.7. Retorno de la inversión (ROI)	131
3.4.8. Valor presente neto (VPN).....	132

3.4.9. Tasa interna de retorno (TIR)	132
3.4.10. Relación costo/beneficio anual (ACR).....	132
3.5. Investigaciones recientes de evaluaciones económicas de bioprocesos y biorrefinerías.....	133
3.6. Resultados.....	134
3.7. Conclusiones	146
Referencias	147

Capítulo IV.

Evaluación ambiental asistida por computador

de una biorrefinería de camarón 149

4.1. Algoritmo de reducción de residuos.....	152
4.1.1. Potencial de toxicidad humana por ingestión (HTPI)	152
4.1.2. Potencial de toxicidad humana por inhalación o exposición dérmica (HTPE).....	153
4.1.3. Potencial de toxicidad acuática (ATP)	154
4.1.4. Potencial de toxicidad terrestre (TTP).....	154
4.1.5. Potencial de agotamiento del ozono (ODP)	154
4.1.6. Potencial de calentamiento global (GWP)	155
4.1.7. Potencial de oxidación fotoquímica (PCOP) o potencial de formación de smog	156
4.1.8. Potencial de acidificación (AP).....	157
4.2. Investigaciones recientes de evaluaciones ambientales de bioprocesos y biorrefinerías.....	160
4.3. Resultados	161
4.4. Conclusiones.....	168
Referencias	169

Capítulo V.

Evaluación exergética asistida por computador

de una biorrefinería de camarón 173

5.1. Evaluación exergética de procesos.....	177
5.2. Investigaciones recientes de evaluaciones exergéticas de bioprocesos y biorrefinerías	181
5.3. Resultados.....	183
5.4. Conclusiones	191
Referencias	191

Capítulo VI.

Análisis de seguridad inherente de una biorrefinería de camarón..... 195

6.1. Índice de seguridad inherente (ISI).....	198
6.1.1. Índice de seguridad inherente química	201
6.1.2. Índice de seguridad inherente de proceso	206
6.2. Investigaciones recientes de evaluaciones de seguridad de bioprocesos y biorrefinerías.....	212
6.3. Resultados.....	213
6.4. Conclusiones	218
Referencias	219

Capítulo VII.

Evaluación de impactos sociales de una biorrefinería de camarón..... 221

7.1. Evaluación del ciclo de vida social (s-LCA).....	223
7.1.1. Definición del objetivo y alcance	224
7.1.2. Inventario	224
7.1.3. Evaluación del impacto.....	228
7.1.4. Interpretación.....	229
7.2. Investigaciones recientes de evaluaciones de impactos sociales de bioprocesos y biorrefinerías.....	230
7.3. Resultados.....	231
7.4. Conclusiones	244
Referencias	245

Capítulo VIII.

Aplicación de la métrica del retorno de la inversión por seguridad y sostenibilidad a una biorrefinería de camarón 251

8.1. Métrica ponderada del retorno de la inversión por seguridad y sostenibilidad (SASWROIM)	254
8.2. Investigaciones recientes de evaluaciones de sostenibilidad de bioprocesos y biorrefinerías.....	256
8.3. Resultados.....	258
8.4. Conclusiones	261
Referencias	261

Capítulo IX.	
Conclusiones generales	265
Abreviaturas.....	271
Glosario	279
Índice de tablas	283
Índice de figuras	287

Agradecimientos

El conjunto de conocimientos que aquí se presentan, así como su articulación y organización en el que se condensan conceptos de tan variadas disciplinas como ingeniería, biología, química, matemáticas, física, ciencia y tecnología de alimentos, ciencias de la computación, estadística, trabajo social, seguridad ocupacional y de procesos, economía, ciencias ambientales entre otros, no hubiese sido posible sin aportes técnicos, consejos, discusiones formales e informales, e incluso debates con amigos, colegas, y colaboradores de distintas disciplinas, a quienes es menester de los autores agradecer en estas páginas, especialmente a Tamy Herrera, Grisel Cogollo, Steffy Arteaga, Samir Meramo, Irene Soto, Miguel Ramos, David Martínez, Camilo Guerrero, Luis Barrera, José Blanco, Fredy López, Carlos Alarcón, Eusebio Orozco, a los profesores Mahmoud El-Halwagi, Sam Mannan (Q.E.P.D.), Alexander Mitsos, Gesira de Ávila, Adriana Herrera, Miladys Torrenegra, Karina Ojeda, Eduardo Sánchez, Lesly Tejeda, Jeffrey León, Alberto Mercado, Pablo Palencia, José España, Andrés Barajas y Néstor Urbina. Igualmente, esta contribución se ha consolidado gracias al respaldo institucional que hemos tenido como autores de las instituciones a las cuales estamos afiliados, por tal motivo, agradecemos a la Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO y a la Universidad de Cartagena por impulsar el desarrollo de esta iniciativa en pro de

la búsqueda de procesos más eficientes y sostenibles que generen impactos positivos en la sociedad y el ambiente. Esperamos que la visión mostrada en este libro, la cual es extrapolable a otros procesos, ayude a los investigadores a la toma de decisiones para el desarrollo sostenible de biorrefinerías a nivel local, regional y nacional.

Ángel Darío González-Delgado
Kariana Andrea Moreno-Sader
Jairo David Martínez-Consuegra

Autores

Ángel Darío González Delgado

Ingeniero Químico y Doctor en Ingeniería Química, con experiencia docente, administrativa y en investigación en universidades públicas y privadas. Ha publicado 205 artículos científicos en las áreas de energías alternativas, ingeniería de procesos, petróleo y gas, y desarrollo sostenible, es autor/co-editor de 8 libros, actualmente es profesor de planta e investigador en la Universidad de Cartagena. Experto en desarrollo de metodologías de evaluación de procesos industriales, síntesis de procesos químicos, evaluación ambiental, económica, energética y de seguridad de procesos industriales, el mejoramiento de procesos químicos, aprovechamiento de energía fósil y renovable, biocombustibles y biorefinerías, y la Ingeniería de Procesos Asistida por Computador. Ha sido evaluador de resúmenes y artículos completos de varias revistas científicas internacionales.

Kariana Andrea Moreno-Sader

Ingeniera Química de la Universidad de Cartagena y estudiante de Doctorado en Ingeniería Química del Instituto Tecnológico de Massachusetts MIT. Realizó pasantías en la Universidad de Alberta y Texas A&M University y en empresas como Ecopetrol SA. Tiene experiencia investigativa en análisis tecno-económico de sistemas de procesos con enfoque en energía y consumo sostenible. Fue

asistente de investigación en la Universidad de Cartagena, en el diseño y análisis de sistemas de proceso a partir de biomásas, que dio origen al presente trabajo. Sus intereses se centran principalmente en el estudio de alternativas sostenibles para descarbonizar el sector del transporte. Tiene más de diez artículos publicados y ha recibido más de cinco reconocimientos por su desempeño académico e investigativo.

Jairo David Martínez-Consuegra

Ingeniero Químico de la Universidad del Atlántico con Maestría en Ingeniería de la Universidad de los Andes, actualmente ejerce el cargo de Vicerrector Académico de la Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO en el Caribe colombiano; también se ha desempeñado como Director del Programa de Ingeniería Química en la Universidad San Buenaventura de la ciudad de Cartagena y ha desarrollado actividad docente en importantes universidades del país en modalidad presencial y virtual, impartiendo asignaturas como: Balance de Materia, Diseño de Plantas, Corrosión, Optimización, entre otras. En el ámbito investigativo ha propuesto e implementado proyectos de investigación y expansión educativa. En su producción académica se destacan artículos científicos, ponencias en eventos de divulgación y consultorías empresariales.

Prólogo

Cuando los autores me contactaron para presentar un prólogo sobre su libro, me sentí muy honrado y complacido, conozco de sus excelentes trabajos y espléndida calidad humana. Recuerdo tertulias en donde fueron trazados y constituidos los primeros lienzos que buscaban dar solución a la convergencia entre el aprovechamiento de residuos, la creación de valor agregado en la industria y el planteamiento de alternativas que generen impacto social. Esta situación sembró una posibilidad de trascender y aplicar fundamentos de ingeniería al servicio de la sociedad. Recuerdo que Ángel lanzó la primera idea, que consistía en tener la posibilidad de incluir fundamentos y conceptos computacionales para realizar análisis especializados y abordar aspectos ambientales; Jairo planteó la posibilidad de entender las necesidades de la región Caribe y dar soluciones desde el sector de producción de camarón y sus residuos; pero fue Kariana, quien planteó el camino para iniciar la construcción de ese lienzo y los primeros trazos para el desarrollo de una biorrefinería a partir del camarón. Un tiempo después pude ver como el lienzo tomó forma y Ángel planteó la necesidad de desarrollar la biorrefinería aprovechando las ventajas tecnológicas y técnicas de la simulación asistida por computadora para evaluar la posibilidad de obtener productos con valor agregado y desde una visión de sostenibilidad.

Ahora bien, desde los antecedentes teóricos y en una revisión rápida, la quitina fue presentada por Herri Braconnot en 1811 a partir de hongos. Posteriormente, en 1878, Ledderhorse presentó la estructura química de la quitina, presentándola como una molécula compuesta de glucosamina. Tras estos estudios Hoppe Seyler en 1894 identificó la relación entre la quitina y el quitosano. Resulta valioso que, en la actualidad, los autores retomen estas perspectivas teóricas y así mismo las apliquen en las localidades, de manera especial en la costa Caribe para brindar soluciones a las problemáticas medioambientales de la zona.

En los últimos años, en Latinoamérica se ha presentado un aumento de la producción camaronera gracias a la demanda requerida por China. Mas específicamente Ecuador y México se han convertido en productores referentes a nivel mundial. En Colombia, nuevas dinámicas han reactivado áreas y se han generado nuevos espacios para esta actividad, lo que aumentó de manera proporcional la generación de residuos. Este aspecto, es uno de los fundamentos principales del libro, una aproximación sostenible, realizando un desarrollo de biorrefinería asistida por computadora, esta iniciativa aporta al sector camaronicultor en Colombia, más específicamente a la región Caribe, un proceso que permite procesar camarones para la producción de quitina, quitosano y astaxantina, y que incluye una visión de responsabilidad social con las comunidades pesqueras de la región.

Desde una mirada global, el quitosano ha venido impactando en diferentes industrias ya sea minimizando el impacto en el ambiente con respecto a componentes sintéticos poliméricos convencionales, posicionándose como un nuevo material que suple el rol de otros componentes potencialmente contaminantes. El desarrollo planteado por los autores presenta diferentes alternativas de obtención de productos, con la entrega de estudios técnicos y económicos de

interés general para la industria agrícola, la industria médica, el sector de tratamiento de aguas, la industria alimenticia, la industria cosmética, entre otras.

Otro fundamento relevante para escribir este prólogo es el estímulo a la industria y la manufactura del camarón, lo que amplía su alcance y fortalece el crecimiento de la industria camaronera, especialmente en la costa Caribe colombiana. Naturalmente, tengo total certeza que el lector encontrará posibilidades para adelantar esfuerzos y estimular a un impacto social positivo alrededor del sector, planteando alternativas sostenibles a retos ambientales, de uso de la energía y manejo de residuos, además de establecer nuevas formas para la generación de valor a partir de la biorrefinería de residuos del camarón. Considero que este libro, sobrepasa las expectativas de conocimiento y planteamientos de alternativas de producción, por su simplicidad y manejo mesurado del sector. Influye también de manera positiva para el crecimiento social, económico y ambiental de la región Caribe, además de abordar aspectos de transformación, modelado, simulación y análisis de los procesos de una biorrefinería de caparazón del camarón para la obtención de quitosano y otros componentes. Finalmente, da apertura a la inspiración y el desarrollo de desafíos que permitan obtener nuevas alternativas sociales, consientes y rigurosas para plasmar un lienzo con nuevo tejido empresarial, soportado en la innovación, la tecnología, el cuidado del medio ambiente y el crecimiento económico y social.

Jeffrey León-Pulido PhD.

Decano de la Facultad de Ingeniería Universidad EAN.

Introducción

Desde distintos puntos de vista y a distintas escalas, se están haciendo esfuerzos para cumplir los Objetivos de Desarrollo Sostenible pactados en 2015 mediante la Agenda 2030, lo cual ha hecho repensar el diseño, desarrollo, análisis y mejoramiento de procesos químicos y bioprocesos, considerando aspectos sociales, ambientales y económicos. Esto ha promovido el desarrollo de industrias sostenibles con tecnologías limpias, estrategias de economía circular y principios de química verde. Dada la importancia de cuantificar la sostenibilidad y expresarla en términos de rentabilidad, se han introducido métricas como el retorno sostenible de la inversión. Sin embargo, los procedimientos y herramientas de medición y análisis de estos indicadores de sostenibilidad siguen estando bajo estudio con miras a la estandarización.

En este libro se muestra un enfoque para el desarrollo, evaluación y medición de la sostenibilidad de topologías de aprovechamiento sostenible combinando tres pilares que, bajo la concepción de los autores, son fundamentales: i) el desarrollo de biorrefinerías como la alternativa más promisoría de aprovechamiento integral de los recursos, valorización de residuos y disminución de impactos negativos, ii) la evaluación de procesos bajo criterios de desarrollo sostenible como la fuente de información primaria sobre el desempeño técnico, energético, ambiental, económico, social y de

seguridad de las topologías desarrolladas, y iii) la medición del retorno sostenible de la inversión como el crisol en el cual convergen los esfuerzos de diseño y análisis de los mismos en un indicador integrado, medible y comparable.

La selección de la materia prima a aprovechar bajo el concepto de biorrefinería se basó en el contexto socioeconómico regional, los principales motores de desarrollo y el potencial de aprovechamiento de recursos. No fue difícil escoger la cadena acuícola del camarón para desarrollar la topología de biorrefinería, teniendo en cuenta las problemáticas regionales relacionadas con desigualdad social, baja calidad de vida, dificultades económicas de la población que se dedica a esta actividad, entre otros. Todo este diagnóstico del sector camaronicultor en Colombia se describe ampliamente en el capítulo uno de este libro, y se complementa con la descripción de las características, bondades y beneficios de los principales productos que se obtienen a partir de los residuos del camarón.

El conjunto de herramientas utilizadas para los desarrollos mostrados en los diferentes capítulos de este libro se engloba dentro de la Ingeniería de Procesos Asistida por Computador a las escalas molecular y piloto, la cual posee un éxito demostrado en los estudios prospectivos para la predicción del comportamiento de sistemas, y con una correcta utilización, para la solución de problemas relacionados con la carencia de información experimental. Estas herramientas permitieron ahorrar valiosos recursos y tiempo en la obtención de resultados, así como evaluar escenarios de cambio que contribuyeron a ampliar el espectro de análisis; la parte final del primer capítulo de este libro describe con mayor detalle las características de la Ingeniería de Procesos Asistida por Computador y los beneficios de su implementación para el diseño y la evaluación de la sostenibilidad de biorrefinerías.

En el capítulo dos se muestra el desarrollo de la topología a estudiar combinando el modelado y la simulación de procesos, se explican los principales esquemas utilizados para la predicción de las propiedades de los sistemas simulados, se muestra la validación de las propiedades obtenidas en la simulación, se elige la capacidad de la planta, los productos a obtener, se muestran secciones que componen la biorrefinería, las eficiencias obtenidas, los equipos a utilizar, el consumo de servicios industriales y otros aspectos técnicos. Estos parámetros técnicos a escala piloto, incluyendo balances extendidos de masa y energía, servirán de base para la incorporación de la topología propuesta en las industrias de procesamiento de camarón.

En el capítulo tres se modela el comportamiento económico de la biorrefinería de camarón mediante dos metodologías: la evaluación técnico-económica de procesos y el análisis de sensibilidad técnico-económica de procesos, a través de las cuales se obtienen los indicadores de rentabilidad de la planta piloto y una predicción de su comportamiento ante cambios externos en el entorno técnico económico bajo la cual se encuentra la biorrefinería, tales como, los costos de materia prima, costos operativos y precio de venta de los productos. Con los resultados que se derivan de esta investigación se mide el retorno económico de la inversión como indicador base de sostenibilidad en el parámetro económico y primer criterio de comparación una vez se obtenga el retorno sostenible de la inversión.

El capítulo cuatro presenta la evaluación ambiental asistida por computador de la biorrefinería de camarón, cuantificando los beneficios ambientales de su implementación y los impactos ambientales potenciales generados, tanto de una manera global, como bajo categorías atmosféricas y toxicológicas. Los sistemas de aprovechamiento de residuos dentro de las industrias camaroneras

podrían reducir o incrementar los impactos del procesamiento convencional sobre el medio ambiente por el uso de sustancias químicas adicionales y la potencial generación de otras corrientes residuales con mayor o menor impacto ambiental. Los resultados aquí analizados permiten medir el progreso de estas industrias hacia la sostenibilidad bajo el parámetro ambiental, al introducir estrategias de biorrefinación.

El capítulo cinco detalla el desempeño energético de la biorrefinería de camarón utilizando la metodología del análisis exergético. Se identifican las etapas del proceso que hacen un mejor aprovechamiento de la energía y los posibles puntos de mejora termodinámica del sistema. De este capítulo se obtiene información primaria sobre la posibilidad de optimización e integración energética y otras estrategias de ahorro de energía considerando parámetros técnicos.

Los capítulos seis y siete introducen al lector a la dimensión social de las biorrefinerías, en un primer momento se muestra el aspecto de seguridad en la operación de la biorrefinería de camarón como una extensión de los impactos sociales que implica una operación intrínsecamente insegura. La metodología utilizada para estos fines es el análisis de seguridad inherente de procesos, mediante la cual se obtienen los índices de seguridad inherente de química y de seguridad inherente de proceso. En un segundo enfoque se aborda el pilar social de la sostenibilidad a través de una metodología híbrida propuesta por los autores, que combina el análisis de ciclo de vida social de procesos con la teoría del cambio, bajo dos ubicaciones distintas con fines comparativos.

Finalmente, con los resultados de las evaluaciones hechas a la biorrefinería en los capítulos dos al siete, se obtienen los indicadores de sostenibilidad utilizados en la cuantificación del retorno sostenible de inversión. A través de la métrica ponderada del retorno

de la inversión por seguridad y sostenibilidad se miden los impactos positivos o negativos de posibles cambios de diseño que surgen cuando se consideran simultáneamente indicadores ambientales, sociales, energéticos y de seguridad. Esta métrica ponderada se compara con el retorno tradicional de la inversión para distintos escenarios de operación técnica de la planta. Además, se analizan los beneficios de incluir la topología en las plantas camaroneras convencionales articulando sostenibilidad y rentabilidad. Junto a las conclusiones descritas para este apartado (capítulo ocho) y anteriores, se introduce el capítulo nueve que resume los hallazgos más promisorios en los análisis de sostenibilidad de la biorrefinería de camarón usando herramientas de ingeniería de procesos asistida por computador. Los capítulos del libro no son contribuciones individuales de los autores mencionados, por lo tanto, los autores del libro corresponden a los autores de cada capítulo.

Resumen

Este libro presenta el diseño, simulación y evaluación sostenible de una biorrefinería integral de camarón para la producción de quitina, quitosano y astaxantina, con una capacidad de procesamiento de 4.110 t/año de camarones. Se registran las mayores eficiencias técnicas en la sección (iv) (91,92 %). Se obtuvo un VPN de 3,76 MM USD y una TIR de 23,6 %. Los componentes volátiles contribuyen a los impactos atmosféricos en la evaluación ambiental. La biorrefinería tuvo una eficiencia exergética de 25,61 % y las mayores pérdidas exergéticas en la etapa lavado de camarón; se obtuvo un ISI de 21 asociado a la desacetilación y al uso de acetona. El SASWROIM fue positivo alcanzando un puntaje de desempeño de 0,49, cercano al umbral deseable de 0,5.

Palabras clave: quitina; quitosano; camarón; astaxantina; biorrefinería; VPN; exergía; ambiental; seguridad de procesos; evaluación sostenible.

Abstract

This book presents the design, simulation, and sustainable evaluation of an integral shrimp biorefinery for the production of chitin, chitosan, and astaxanthin, with a processing capacity of 4,110 t/year of shrimp. The highest technical efficiencies recorded in section (iv) (91.92%). A NPV of 3.76 MM USD and an IRR of 23.6% were obtain. Volatile components contribute to atmospheric impacts in the environmental assessment. The biorefinery had an exergetic efficiency of 25.61% and the highest exergetic losses in the shrimp washing stage; an ISI of 21 associated with deacetylation and the use of acetone was obtaining. The SASWROIM was positive, reaching a performance score of 0.49, close to the desired threshold of 0.5.

Keywords: chitin; chitosan; shrimp; astaxanthin; biorefinery; NPV; exergy; environmental; process safety; sustainable evaluation.

The background of the entire page is a solid orange color. It is decorated with a repeating pattern of white line-art illustrations. The illustrations include several shrimp in various orientations (some facing left, some right, some top-down) and several fish, including what appears to be a tilapia-like fish, also in various orientations. The lines are thin and clean, creating a subtle, textured effect.

Capítulo I.

Diagnóstico del sector camaronicultor en Colombia e introducción a las biorrefinerías

La pesca y la acuicultura en Colombia son sectores importantes en la producción de alimentos para consumo nacional y exportación; por lo tanto, se consideran dentro de los principales motores de crecimiento económico del país, dada la creciente demanda de productos del mar a nivel mundial (Acosta, 2019). En Colombia, la pesca y las actividades acuícolas se realizan a nivel industrial y artesanal en los mares y zonas costeras, y a nivel artesanal en las aguas interiores o continentales (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019). Se conoce que la pesca de captura en la última década ha disminuido su producción a causa del agotamiento del recurso pesquero, motivado principalmente por la sobreexplotación de los recursos comerciales, la utilización de métodos ilegales de pesca (ejemplo de ello es la pesca con pólvora) y la utilización de artes de pesca inadecuadas que no cumplen la reglamentación para captura selectiva (Guagua, 2020).

Por su parte, la acuicultura ha aumentado su participación en la producción nacional de productos pesqueros. En la actividad piscícola continental se ha registrado un crecimiento promedio anual de aproximadamente 7 % durante los años 2009 al 2018, destacándose la producción de Cachama y Tilapia. Mientras que para la

acuicultura marina, el cultivo de camarón ha sido el principal producto de referencia para el país en los últimos 30 años (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019). No obstante, durante los años 2013 y 2015 la producción de camarón experimentó una disminución significativa que llegó hasta las 3.500 toneladas y desde entonces ha venido recuperándose con incrementos anuales aproximados del 9 % (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019). En 2018, la producción de camarón en Colombia ya alcanzaba las 5.307 toneladas, luego de mostrar un aumento histórico del 21% comparado con la producción para 2017. La acuicultura en Colombia ha alcanzado un alto nivel industrial que ha permitido llevar el producto nacional a mercados internacionales; se estima que la comercialización del camarón en el exterior sumó USD 26,5 millones en el 2018 (Hernández et al., 2020). Según el Ministerio de Agricultura, en los años 2019 y 2020 las exportaciones de camarón fueron de 4.431 y 4.670 toneladas, respectivamente, con un valor de 25.559 miles USD para 2019 y 22.328 miles USD para 2020. Durante el período de enero a junio de 2021, en el país el cultivo de camarón tuvo una disminución en su valor del 22,78 % y del 19,37 % en volumen de exportaciones con respecto al mismo período de 2020 (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021).

El camarón es uno de los mariscos más consumidos debido a su buen sabor y a sus beneficios para la salud contra las enfermedades del corazón y del cerebro. Según la empresa de investigación de mercados IMARC Group, el mercado mundial del camarón alcanzó un volumen de 5,10 millones de toneladas en el 2019 (IMARC Group, 2020; Meramo-Hurtado, 2020). En Colombia, la camaronicultura es desarrollada principalmente en el mar Caribe dado a que esta región se caracteriza por tener lechos marinos más aptos para el desarrollo de este tipo de actividad, en comparación con el litoral Pacífico. Se estima que aproximadamente el 99 % de la producción

nacional de camarón corresponde al litoral Caribe, principalmente al departamento de Bolívar con 4.534 toneladas/año para 2018 (Puentes, 2014; González Bell, 2019). Para 2019 y 2020 se experimentó un incremento en la producción alcanzando 4.862 y 4.700 toneladas de camarón producidas en esta región del país. Para 2021, el 89 % de la actividad pecuaria del departamento de Bolívar se centró en la producción de camarón (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020, 2021). Por otro lado, según el reporte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, en 2020 la producción de camarón a nivel mundial fue de 4.267.500 toneladas métricas (Diwan et al., 2022).

Durante los años 2017 y 2019 los indicadores mostraron un crecimiento en los niveles de producción de camarón, lo que evidencia el interés por fortalecer un proceso de reactivación de esta industria en Colombia. La producción nacional del camarón y pesquera en general enfrenta serios problemas relacionados con el alto precio de los combustibles utilizados en la actividad, costos de producción (principalmente bienes importados) y la falta de modernización de las plantas de procesamiento (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019). Así mismo, el desarrollo económico de las poblaciones dedicadas a las actividades de pesca y acuicultura es precario, tal como lo señala el indicador NBI (Necesidades Básicas Insatisfechas) y el Índice de Calidad de Vida (DANE, 2018). Además, el producto interno bruto per cápita de los departamentos de la región Caribe colombiana dedicados a la producción de camarón estuvo por debajo de la media nacional para el año 2020 (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021; DANE, 2019). La disminución en la producción y en las exportaciones de camarón, puede estar relacionada con la pandemia Covid 19 que inició en marzo de 2020. Debido a esto, el mercado alimentario

marino de Latinoamérica y el Caribe se vio afectado, en especial en productos frescos como camarón y salmón (FAO, 2020).

Por otro lado, el procesamiento de este marisco genera enormes residuos sólidos no comestibles, como cabezas, cola y caparazones (alrededor del 48-60 % del camarón es desechado), lo que provoca un grave problema que afecta tanto a la salud pública como al medio ambiente (Kandra et al., 2012; Pattanaik et al., 2020). Las comunidades locales en la región Caribe han denunciado varias afectaciones relacionadas con la descomposición de la materia orgánica y la atracción de vectores transmisores de enfermedades infecciosas (Mao et al., 2017). La falta de alternativas adecuadas de gestión y valorización de residuos en el procesamiento de camarones es reconocida como la principal causa de estos problemas de contaminación.

Figura 1. *Camarón cultivado en la costa Atlántica*



Fuente: Instituto Colombiano Agropecuario (2011).

En este contexto, se justifica la búsqueda de alternativas de aprovechamiento y valorización de los residuos que genera el procesamiento del camarón, las cuales, bajo el contexto político,

económico y ambiental actual, deben apuntar hacia la sostenibilidad y a generar mayores ingresos a las familias dedicadas a la industria camaronera localizada en la región Caribe colombiana y mejorar el nivel de bienestar de todas estas comunidades. Se propone por tanto, que estas actividades de acuicultura se desarrollen de manera sostenible, reconociendo la interacción entre los factores ambientales, económicos y sociales (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019); todas estas actividades productivas deben generar bienestar a las presentes y futuras generaciones.

Los residuos de camarón son una fuente de compuestos naturales como la quitina, la astaxantina, las proteínas y los lípidos (Ibrahim et al., 1999), que tienen numerosas aplicaciones en la agricultura, la alimentación, la medicina, la farmacia, los textiles y el tratamiento del aguas (Mao et al., 2017). Por tanto, el aprovechamiento sostenible de estos residuos se perfila como una alternativa promisoría para impulsar el rendimiento económico de las industrias camaroneras convencionales y, simultáneamente, reducir sus impactos ambientales. Sin embargo, para comenzar a definir las potenciales alternativas de valorización, es necesario conocer un poco más a fondo las características de los productos que se obtienen a partir de los residuos del camarón, los cuales se detallan a continuación.

1.1. Quitina

La quitina es el segundo polímero natural más abundante después de la celulosa, y es la materia prima principal para producir quitosano. Es un biopolímero lineal altamente insoluble en agua, que comprende unidades β -DN- acetil-glucosamina enlazadas en 1,4 (Mohan et al., 2021; Zhang, 2022) (ver figura 1.1a) y forma parte

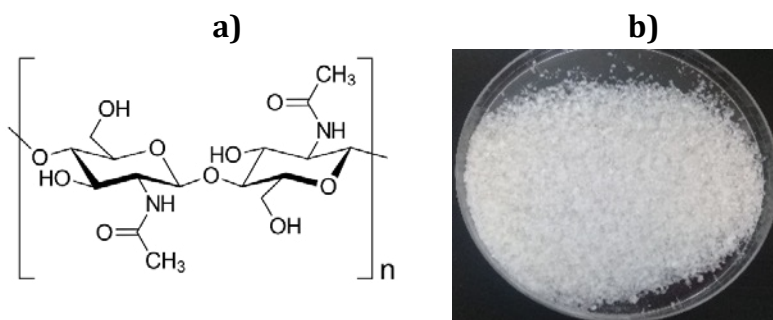
de la estructura celular de crustáceos (Kumari, et al., 2015), hongos (Maddaloni, et al., 2020; Liao & Huang, 2019), bacterias (Yen & Mau, 2007), insectos, microalgas (Zhang et al., 2022), moluscos (Rasti et al., 2016), artrópodos (Hamed et al, 2016), algas coralinas (Rahman & Halfar, 2014), esponjas de agua dulce (Ehrlich et al., 2013), entre otros. Se sugiere que la principal fuente de quitina a nivel mundial son las cutículas del zooplancton, con un estimado de 379 millones de toneladas disponibles en todo el mundo (Atkinson et al., 2009). Sin embargo, la pesca de estos diminutos organismos no es comercialmente viable a diferencia de los desechos de la industria del marisco, como las conchas (exoesqueletos o cutículas) de camarón, cangrejo y langosta, cuyo contenido de quitina oscila entre el 15 % y 40 %; es por ello que constituyen la principal fuente de quitina industrial (Giraldo y Reyes, 2022; Charoenvuttitham et al., 2006).

La quitina pura es un sólido blanco o rosa pálido, inodoro e insípido (ver figura 1.1b), insoluble en todos los disolventes regulares, como agua, disolventes orgánicos y ácidos o bases suaves (Roy et al., 2017; Rinaudo, 2006), con alta resistencia a la tracción (Bamba et al., 2017) y baja reactividad. La quitina posee excelentes propiedades como la biocompatibilidad, la biodegradabilidad, la no toxicidad y la adsorción, resistencia mecánica (Jayakumar et al., 2011; Jiang et al., 2022). Además, muestra propiedades beneficiosas para las aplicaciones de vendaje de heridas, incluyendo actividad hemostática, aceleración de la curación, y propiedades antiinfecciosas (Naseri et al., 2014). Jones et al. (2020) realizaron una revisión de la quitina de crustáceos y hongos en el tratamiento de heridas, y encontraron propiedades biomédicas comprobadas; la quitina constituye poderosos agentes medicinales naturales, con el potencial de hacer avanzar la medicina moderna. La quitina es usada en una gran variedad de campos, por ejemplo como agente antibacteriano y antitumoral (Younes et al., 2014), como

componentes de huesos y piel artificial (Islam et al., 2017), para la administración de fármacos en el campo biomédico (de Souza et al., 2020), la detección y eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos para la remediación ambiental (de Oliveira et al., 2016), en la industria cosmética (Aranaz, 2018), en la fabricación de papel, la agricultura (ZhangI, 2022), como agente floculante en el tratamiento de aguas y como estabilizador en la alimentación (Barikani et al., 2014; Oyatogun et al., 2020).

Figura 1.1. a) Estructura química de la quitina. b)

Quitina a partir de exoesqueleto de camarón



Fuente: a) Castañeda et al. (2011). b) Elaboración propia.

La quitina se aísla comúnmente mediante métodos químicos que incluyen la desmineralización con ácido fuerte y la desproteínización con una sustancia alcalina fuerte para eliminar el carbonato de calcio (CaCO_3) y las proteínas, respectivamente; esta sal causa baja solubilidad en la quitina y debe aislarse para producir quitosano (Preciado, 2022). Sin embargo, el uso de ácidos fuertes o soluciones alcalinas conlleva al consumo de grandes cantidades de agua para los pasos de neutralización, entre tratamientos ácidos y alcalinos; además de los tiempos prolongados, siendo estas las principales limitantes de los protocolos de extracción

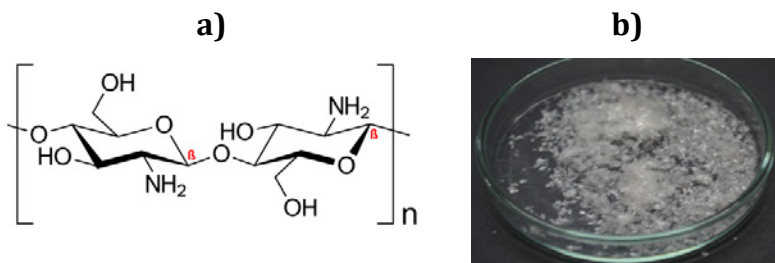
convencionales reportados (Nawawi, 2020). Por lo tanto, se han estudiado alternativas ecológicas para la extracción de quitina; Saravana et al. (2018) emplearon un solvente verde denominado solvente eutéctico profundo (DES) (cloruro de colina-ácido malónico) para la extracción de quitina de las conchas de camarón *Marsupenaeus japonicas*. La quitina recuperada mostró una alta pureza con un rendimiento del $19,41 \% \pm 1,35 \%$. Borić et al. (2020) aplicaron un proceso híbrido compuesto de plasma y desmineralización utilizando ácidos orgánicos para el aislamiento de quitina y para disminuir la formación de residuos del proceso. Los resultados mostraron que la integración de plasma a base de nitrógeno y la desmineralización del ácido láctico permite la eliminación del 90 % de las proteínas y asegura la eliminación completa de minerales de los desechos de los caparazones de camarón. Younes et al. (2014) estudiaron la extracción de quitina por tratamiento enzimático, encontrando que la quitina por desproteínización enzimática tiene un peso molecular más alto que el obtenido mediante el proceso convencional. Además, la extracción de quitina a escalas piloto e industrial ha sido estudiada desde varios aspectos técnicos; Lopes et al. (2018) evaluaron la extracción de quitina a pequeña escala a partir de caparazones de crustáceos por vías químicas y enzimáticas teniendo en cuenta aspectos económicos, medioambientales y de seguridad. Los resultados indicaron que el proceso enzimático podría ser una alternativa adecuada a considerar para la extracción de quitina, especialmente si hay recuperación de agua. Para 2020 la producción de quitina a nivel mundial fue aproximadamente de 200 billones de toneladas métricas anuales (Romero y Pereira, 2020).

1.2. Quitosano

El quitosano es un polisacárido policatiónico desacetilado derivado de la quitina (Sharma et al., 2021). Está estructuralmente compuesto de cadenas distribuidas aleatoriamente de β -(1-4) D-glucosamina (unidades deacetiladas) y N-acetil-D-glucosamina (unidad acetilada) (Moreno, 2019), como se muestra en la figura 1.2a. Los parámetros del proceso de desacetilación y despolimerización influyen en gran medida en diversas propiedades fisicoquímicas del quitosano. En general, el quitosano posee propiedades biodegradables, no tóxicas, biocompatibles, antioxidantes, espermicidas, inmunológicas y antimicrobianas (Abd El-Hack et al., 2020). Además, ha mostrado potentes características antifúngicas contra cepas de hongos mortales como las cepas de *Candida* que contribuyen a una multitud de infecciones en humanos, animales y especies de bacterias (Yang et al., 2005). El quitosano puede emplearse para controlar enfermedades en plantas y reducir su propagación, también, puede mejorar la biodiversidad en la rizosfera, tanto la quitina como el quitosano se han estudiado para ser usados en actividades agrícolas (Saberri et al., 2022).

Cabe destacar que este compuesto es soluble en una gran cantidad de ácidos orgánicos e inorgánicos, y se comporta como un polielectrolito catiónico, siendo el único polímero de origen natural considerado como tal, lo que hace que se adhiera fácilmente a las superficies cargadas negativamente y puede formar quelatos con iones metálicos (Moreno, 2019).

Figura 1.2. a) Estructura química del quitosano. b) Quitosano a partir de la desacetilación de la quitina



Fuente: a) Cusihuama, (2017). b) Elaboración propia.

Las dos propiedades físicas más importantes del quitosano son el grado de desacetilación y el peso molecular (Moreno, 2019). El grado de desacetilación es un parámetro que indica el porcentaje de conversión de quitina en quitosano. La importancia de este parámetro radica en que interviene en propiedades fisicoquímicas como la solubilidad y la viscosidad, además, influye en los efectos sobre los patógenos y las propiedades biológicas de la sustancia (Saberri et al., 2022; Espinoza, 2007). El grado de desacetilación depende principalmente de la temperatura y tiempo de reacción, esta se puede realizar mediante un proceso químico usando álcalis o ácidos y por medio de enzimas (Saeedi et al., 2022).

El quitosano comercial (figura 1.2b) reporta un grado de desacetilación que oscila entre el 60 % y el 95 % (Moreno, 2019); sin embargo, otros autores apoyan que una quitina desacetilada en más de un 50 % ya tiene propiedades de quitosano (Croisier & Jérôme, 2013). Por su parte, el peso molecular también tiene efectos en la funcionalidad del quitosano; el descenso del peso molecular del polímero provoca reducción de los coeficientes de hinchamiento y variaciones en su bioactividad (Saborit, 2015). Además, en función de su peso molecular, el quitosano puede utilizarse como espesante, regulador de viscosidad o estabilizador.

Las distintas características y propiedades del quitosano abren un mundo de posibilidades en cuanto a su aplicabilidad. Trabajos recientes han evidenciado que el quitosano se puede usar en muchas aplicaciones, como la floculación (Picos-Corrales, 2020), la síntesis de resinas para la adsorción de colorantes (Gu et al., 2019) y la liberación controlada de fármacos (Gómez-Ríos et al., 2017). Además, se ha estudiado su aplicación en la agricultura para estimular el crecimiento de los cultivos, así como nutriente para los suelos y plantas. En la medicina es empleado como regenerador de tejidos óseos, musculares y cutáneos (Arya et al., 2017). El quitosano también ha sido usado para la conservación de frutas y verduras, así como para el tratamiento de bebidas como el vino.

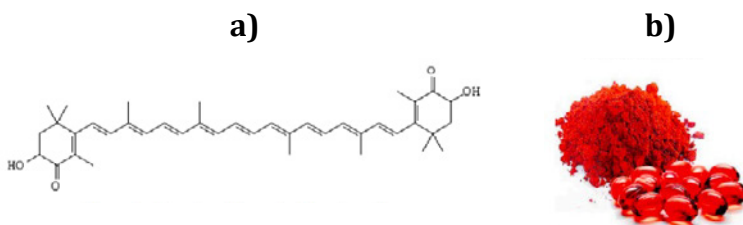
El método más empleado para la obtención de quitosano es a través de la desacetilación de la quitina en una solución alcalina concentrada, típicamente hidróxido de sodio (NaOH). Así, el quitosano se obtiene cuando el nivel de desacetilación de la quitina alcanza el 50 %, volviéndose soluble en medio ácido (Rinaudo, 2006). Actualmente, el mercado global del quitosano es dominado por Japón, quien representó un 37 % del mercado internacional del quitosano en 2018 (Moreno, 2019). No obstante, países como China, India y Estados Unidos se han visto fuertemente atraídos por esta industria, dado el crecimiento del mercado.

1.3. Astaxantina

Los carotenoides son pigmentos solubles en lípidos que tienen dobles enlaces conjugados y son la clase más común de pigmentos que se encuentran en la naturaleza (Nakano & Wiegertjes, 2020); se han identificado aproximadamente 750 tipos de carotenoides. Estos pigmentos son los encargados de impartir color a los

organismos vivos como plantas, aves, peces, crustáceos y bacterias. Los carotenoides se clasifican en carotenos, que están compuestos de carbono e hidrógeno, y xantofilas que también contienen oxígeno (Priharto et al., 2020). La astaxantina (o 3,3'-dihidroxi- β , β -1-caroteno-4,4'-diona) es un pigmento carotenoides de color rojo-anaranjado que pertenece a la familia de las xantofilas (Shah et al., 2016; Dave et al., 2020) y se encuentra predominante en las conchas de crustáceos y salmones (Chao et al., 2020). En la figura 1.3 se presenta la estructura química para la astaxantina (a) y su forma más comercial (b).

Figura 1.3. a) Estructura química de la astaxantina. b) Astaxantina



Fuente: a) Ranga et al. (2014). b) Zuorro et al. (2021).

La astaxantina disponible en el mercado puede ser de dos tipos: natural o sintética (Dave et al., 2020). Actualmente, la mayor parte de la astaxantina se produce de forma sintética mediante reacciones químicas, pero no está aprobada para consumo humano; la astaxantina natural es más segura que la sintética, pero su producción requiere métodos de extracción con un costo elevado (Shah et al., 2016; Wang et al., 2022). La principal fuente natural de astaxantina son los microorganismos. La microalga *Haematococcus pluvialis* es la fuente más utilizada para la producción comercial de astaxantina (Routray et al., 2019). No obstante, en las últimas décadas se han investigado subproductos de crustáceos por su viabilidad para la

extracción de astaxantina natural; los exoesqueletos de camarón han mostrado ser una opción atractiva para la recuperación de este pigmento (Mao et al., 2017; Cong et al., 2019).

La recuperación de la astaxantina se ha estudiado mediante técnicas de extracción con fluidos supercríticos, extracción con agua subcrítica y extracción con disolventes como la acetona y líquidos iónicos (Machmudah, 2018; Wu et al., 2020). La tecnología con fluidos supercríticos ofrece ventajas sobre los métodos convencionales para mejorar la selectividad de la recuperación y evitar trazas de disolvente en el producto final (Molino et al., 2020). A pesar de los inconvenientes de la extracción basada en productos químicos, los disolventes orgánicos se siguen utilizando para la recuperación de productos de alto valor a partir de residuos marinos.

Por otro lado, es importante mencionar que la astaxantina tiene una fuerte actividad antioxidante a través de la eliminación de una variedad de radicales reactivos (Chen & Kotani, 2016). La astaxantina es conocida como la “superestrella de los antioxidantes” (Niizawa et al., 2018) con una actividad antioxidante de 100 a 500 veces mayor en comparación con otros carotenoides (Fakhri et al., 2018). Sin embargo, la astaxantina sintética tiene una actividad antioxidante mucho menor en comparación con la astaxantina de origen natural (Shah et al., 2016). Numerosos estudios demuestran el potencial de la astaxantina en la prevención y el tratamiento de diversas enfermedades, como la inflamación, la diabetes, disfunción hepática, enfermedades cardiovasculares, cáncer, enfermedades neurodegenerativas, trastornos gástricos y gastrointestinales, problemas oculares, afectaciones musculares, problemas de fertilidad masculina y la salud renal (Wang et al., 2019; Mularczyk et al., 2020); además, contrarresta la calcificación vascular *in vitro* (Chao et al., 2020). Debido a estos beneficios, la astaxantina ha sido añadida en una variedad de productos del mercado como alimentos, bebidas,

suplementos nutricionales, productos biomédicos y cosméticos (Routray et al, 2019). La astaxantina también se utiliza a menudo como colorante para la acuicultura y productos alimenticios (Lim et al., 2018), particularmente como suplemento en la nutrición acuícola debido a que mejora el rendimiento del crecimiento y la supervivencia de los peces (Lim et al., 2019), así mismo, provee color a los peces que no tienen acceso a fuentes naturales de carotenos por crecer enjaulados (Tuan et al., 2022).

1.4. El concepto de biorrefinería

El término *biorrefinería* hace parte de la literatura científica desde 2001. Sin embargo, con el pasar de los años se han brindado distintas definiciones del término ampliando su panorama y alcance.

La Agencia Internacional de Energía define una biorrefinería como un esquema para producir varios productos incluyendo biocombustibles a partir de una determinada materia, dando competitividad económica a los biocombustibles y valor agregado a sus coproductos (González-Delgado et al., 2015). Otro concepto similar define a una biorrefinería como un proceso o combinación de procesos para convertir la biomasa en un amplio espectro de productos como alimentos, bioquímicos, biocombustibles, energía o biomateriales (Moshkelani et al., 2013).

IEA Bioenergy Task 42 presenta una definición más exhaustiva manifestando que “la biorrefinería es el procesamiento sostenible de la biomasa en un espectro de productos comercializables y energía” (Cherubini, 2010, pp.1414). Una biorrefinería también es resalada como una colección de procesos para producir cero desechos y mediante el cual cada componente del proceso se convierte en una herramienta para agregar valor (Xiu et al., 2011). Por lo tanto,

se caracteriza principalmente por su baja demanda energética a través de integración de procesos y baja producción de residuos.

Una biorrefinería puede producir un combustible en gran cantidad, productos de bajo volumen, pero de alto valor agregado y a su vez, puede generar electricidad o calor para autoabastecerse. Así, se aumenta su rentabilidad, se satisfacen necesidades energéticas y se minimizan costos de energía. Desde este punto, la biorrefinería se considera una herramienta prometedora gracias a que reduce la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), como el CO_2 , el CH_4 y el N_2O (Liska et al., 2009) y mitiga la dependencia del petróleo.

El concepto de una biorrefinería ha sido comparado desde sus inicios con el concepto de refinerías de petróleo, y entendido como la separación y/o transformación de una matriz de especies químicas para el aprovechamiento de sus fracciones. Sin embargo, los productos de una biorrefinería no solo incluyen los productos obtenidos en una refinería de petróleo, sino también productos que no se pueden obtener a partir del crudo, esto es, porque a diferencia de las refinerías tradicionales de petróleo, las biorrefinerías utilizan la biomasa como principal materia prima para la producción de esta amplia gama de productos para diferentes mercados (Sarma et al., 2010). Adicionalmente, el procesamiento de biomasa considera etapas que no hacen parte de las configuraciones de proceso encontradas en refinerías de crudo, lo que hace que para la síntesis de estos bioprocesos se deban seguir unas reglas de diseño particulares. Desde el punto de vista económico, mientras que las refinerías de petróleo se benefician de las economías de escala al disminuir los costos de producción por unidad de masa mediante el procesamiento de grandes volúmenes, las biorrefinerías poseen características que permiten que el procesamiento a pequeña escala de la materia prima sea más factible.

La situación ambiental actual ha impulsado la transición hacia procesos sostenibles, incluyendo el desarrollo de biorrefinerías para garantizar la seguridad química en un mundo en el que las materias primas derivadas del petróleo se agotan gradualmente. Sin embargo, el reto para estas instalaciones se halla en que los productos obtenidos en biorrefinerías deben ser capaces de sustituir a los productos químicos generados en la refinería actual basada en el petróleo, ya sea obteniendo el mismo producto químico o generando un compuesto diferente con las mismas propiedades funcionales (Sarma et al., 2010; Vilches y Gil, 2016).

La clasificación de las biorrefinerías puede ser vista desde varias perspectivas, según sus materias primas, según los métodos de obtención de los bioproductos utilizados, o según la eficiencia y el grado de optimización del aprovechamiento de la biomasa.

Si se tiene en cuenta el tipo de materia prima utilizada en las biorrefinerías, estas pueden ser clasificadas en biorrefinerías primarias, las cuales tienen como insumo biomasa cosechada en bosques o tierras agrícolas, y son en su mayoría cultivos comestibles como caña de azúcar, aceite de palma o maíz; biorrefinerías secundarias, cuyas materias primas son biomasa residual de procesos agrícolas, principalmente biomasa lignocelulósicas y cultivos no comestibles como jatropha, higuera, raquis de palma, bagazo de caña de azúcar o aserrín, y biorrefinerías terciarias, que son aquellas que utilizan como materia prima desechos posconsumo, como aguas residuales domésticas o industriales, desechos sólidos urbanos o grasas residuales.

Si se toma como criterio los métodos de obtención de los bioproductos, se puede, en una primera aproximación, hacer una clasificación en dos grandes bloques; el primer bloque son las biorrefinerías térmicas, en las cuales la biomasa es sometida a altas temperaturas y presiones moderadas o altas, con o sin presencia

de atmósferas inertes o catalizadores, con el propósito de obtener componentes sólidos conocidos como biochar, componentes líquidos principalmente en dos fases, una acuosa y una aceitosa conocida como bio-oil, y componentes gaseosos conocidos en conjunto como biogás. Estos productos pueden ser procesados como sus equivalentes de origen fósil y potencialmente ser transformados utilizando la infraestructura actualmente instalada de refinerías tradicionales. El segundo bloque son las biorrefinerías de extracción/transformación o de fraccionamiento, donde se separan selectivamente los metabolitos mediante métodos extractivos, aprovechando afinidades entre sustancias y la modificación de propiedades termodinámicas y termofísicas de las especies químicas con cambios en presiones, temperaturas y composiciones. Por lo general, luego de una separación primaria o un pretratamiento, los componentes obtenidos de la biomasa se purifican y/o transforman. La biorrefinación de biomasa bajo el esquema de extracción/transformación o de fraccionamiento, implica la evaluación y el uso de una amplia gama de tecnologías para separar la biomasa en sus principales componentes (carbohidratos, proteínas, triglicéridos, sustancias especiales, etc.), que posteriormente se pueden transformar en productos de valor agregado, biocombustibles y energía a través de la aplicación de otros procesos.

Si se toma como criterio la eficiencia y el grado de optimización en el aprovechamiento de la biomasa, que se relaciona a su vez con el grado de madurez de la tecnología, las biorrefinerías se catalogan como de primera, segunda y tercera generación (de Armas-Martínez et al., 2019), tal como se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. *Clasificación de biorrefinerías basadas en las generaciones tecnológicas*

Generación	Materias primas	Productos
Biorrefinerías de primera generación	Azúcares reductores, almidón, aceites vegetales o grasas animales	Bioalcoholes, aceite vegetal, biodiesel, biosingas, aditivos químicos
Biorrefinerías de segunda generación	Cultivos no alimentarios, pajas de trigo, madera de maíz, residuos sólidos, cultivos energéticos	Bioalcoholes, bio-oil, biohidrógeno, bios-Fischer- Tropsch Diesel, aditivos químicos
Biorrefinerías de tercera generación	Algas	Aceite vegetal, biodiesel, bioqueroseno, nutracéuticos, productos farmacéuticos

Fuente: modificada de Galanopoulos et al. (2019).

En las biorrefinerías de primera generación se producen básicamente biocombustibles; las topologías de segunda generación comprenden el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica y como paso clave incluyen la descomposición de los polímeros (lignina, celulosa y hemicelulosa) en sus monómeros constituyentes antes de la conversión en productos químicos de valor agregado (Ajao et al., 2018); finalmente, en las biorrefinerías de tercera generación las materias primas son insumos vegetales no alimenticios de crecimiento rápido y con una alta densidad energética almacenada en sus componentes químicos (de Armas-Martínez et al., 2019).

En el año 2010, el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), publicó una lista de doce especies químicas que pueden ser obtenidas a partir de biomasa, entre las cuales se encuentran el ácido aspártico, el ácido cítrico, el ácido fumárico, el ácido glutámico, el ácido itacónico, el ácido láctico, el ácido levulínico, el ácido succínico, la glicerina, el sorbitol y el xilitol. Posteriormente,

este mismo ente gubernamental catalogó las biorrefinerías bajo cinco perspectivas:

1. Biorrefinería basada en el azúcar: incluye procesos que transforman la biomasa en productos de valor añadido utilizando hexosas (C6) o pentosas (C5) como precursores (Vaz Rossell et al., 2008).
2. Biorrefinerías de base termoquímica: requieren el uso de condiciones de alta temperatura/presión, que se asocian a tecnologías como la combustión, la gasificación, la torrefacción, la licuefacción hidrotérmica o la pirólisis, en la producción de biocombustibles y químicos (Salan, 2017).
3. Biorrefinerías de base bioquímica: incluyen procesos como la fermentación, la digestión anaeróbica o las reacciones enzimáticas (estas biorrefinerías tienen similitudes con la basada en el azúcar y muchos procesos de base bioquímica pertenecen a ambas categorías) (Qureshi et al., 2014).
4. Biorrefinerías basadas en procesos químicos: emplean tecnologías de procesamiento como procesos catalíticos, esterificación, hidrólisis y cambio de agua a gas, entre otros (Kafarov & González-Delgado, 2011).
5. Biorrefinerías basadas en procesos mecánicos/físicos: incluyen operaciones de reducción de tamaño o de extracción utilizando tecnologías como el pretratamiento mecánico, la molienda o la destilación, donde no se modifica la estructura química de los componentes.

Otros criterios adicionales utilizados para la clasificación de biorrefinerías son el grado de integración de las tecnologías, la capacidad de procesamiento y el grado de centralización. Se puede hablar de biorrefinerías integradas cuando la topología de procesamiento se enfoca en la integración de varias tecnologías de

transformación de biomasa, por lo que una biorrefinería integrada debe poseer más de una tecnología de conversión de biomasa, gracias a esto, se argumenta que las biorrefinerías integradas pueden utilizar múltiples materias primas para obtener distintos productos.

Al referirse a biorrefinerías de pequeña escala (aunque no se puede dar un rango de capacidad para definir las, ya que para cierta materia prima 25 t/h puede ser gran escala, para otra materia prima las mismas 25 t/h puede ser pequeña escala), se habla de topologías de aprovechamiento de biomasa caracterizadas por poseer menores riesgos para la inversión y una mayor holgura para la innovación, almacenar materias primas más prolongadamente, generar mayores beneficios a los agricultores gracias a aprovechamientos locales, mostrar mayor potencial para la reutilización de residuos y menores movimientos de transporte para materias primas, productos intermedios, servicios industriales y productos finales, lo que repercute en menores costos de transporte en comparación con las biorrefinerías de gran escala, las cuales se caracterizan por tener mayores esfuerzos logísticos, menores costos de producción unitarios, mejor aprovechamiento de la energía y beneficiarse de tecnologías maduras y probadas, todo esto derivado de las economías de escala.

Finalmente, se pueden clasificar en biorrefinerías descentralizadas, las cuales se caracterizan por poseer varias unidades pequeñas de procesamiento a nivel local cerca de las áreas de cultivo en donde se obtienen productos intermedios. Estos son llevados a una unidad de gran escala, donde se transforman en productos finales. También se caracterizan por tener la posibilidad de ser modulares y/o móviles para algunas de las etapas de procesamiento, tener mayores posibilidades de aprovechamiento de minerales a nivel local para los propios cultivos al tener pequeños módulos de

procesamiento adyacentes a las áreas cultivadas y alta adaptabilidad dada su “segmentación”. Por otro lado, las biorrefinerías centralizadas se caracterizan por realizar todo el procesamiento de la biomasa en un mismo lugar, siendo únicamente las materias primas las que se transportan hacia sus instalaciones desde uno o varios lugares para ser procesadas, mas no productos intermedios obtenidos localmente, como sucede en las biorrefinerías descentralizadas.

1.5. Ingeniería de Procesos Asistida por Computador como herramienta de diseño y evaluación de sostenibilidad de biorrefinerías

La Ingeniería de Procesos Asistida por Computador (CAPE, por sus siglas en inglés) trata de la gestión y el desarrollo de mecanismos de simulación que puedan recrear la realidad, con el fin de brindar información acerca del comportamiento de un fenómeno bajo ciertas condiciones establecidas, haciendo uso de computadores y softwares especializados, todo esto con el fin de: i) ahorrar recursos y tiempo para los casos en que aún no se tenga el diseño del proceso, o la planta no se haya construido, o no se encuentre en operación y/o se desconozca el comportamiento del medio, ii) analizar la sensibilidad, la resiliencia y el comportamiento del proceso ante posibles cambios operacionales, en caso que el proceso ya exista y se encuentre en operación, pero que por alguna razón, no sea posible manipular físicamente las variables operativas del mismo o perturbarlo.

La ingeniería de procesos asistida por computador permite el desarrollo de sistemas, productos y procesos a través de una amplia gama de fenómenos moleculares, genéticos y termodinámicos, y puede trabajar en múltiples escalas (molecular, piloto e industrial).

Esta técnica se apoya en el modelado, la síntesis, diseño, control, optimización y resolución de problemas con sus dominios en productos y procesos, lo que implica cambios en la sostenibilidad, los procesos de negocio, los sistemas biológicos, la energía y el agua (Vargas-Mira et al., 2019). La CAPE es un tópico multidisciplinario, ya que además de habilidades de ingeniería de procesos, también requiere conocimientos de informática, matemáticas avanzadas, economía, exergía, medio ambiente, impactos sociales, seguridad, entre otros (Agachi, 2014).

Para el diseño, operación, análisis, control y mejoramiento de una biorrefinería se tiene que considerar un alto número de parámetros técnicos, económicos, ambientales, sociales y de seguridad, superando en algunos casos las 100.000 variables, donde, además es posible tener ecuaciones no lineales del orden de miles, lo cual en muchos casos se hace difícil de manipular con técnicas de ingeniería tradicional. Es bajo esta situación que la Ingeniería de Procesos Asistida por Computador aparece como una herramienta que permite el manejo eficiente y organizado de estos órdenes de magnitud, además de permitir el desarrollo de estudios prospectivos, que son altamente pertinentes con aquellas tecnologías que han sido probadas solamente a escala de laboratorio o de pequeñas plantas demostrativas, como es el caso de las tecnologías emergentes de biorrefinación de materias primas novedosas o desechos desaprovechados.

Teniendo en cuenta el diagnóstico, las teorías y los conceptos abordados en este capítulo, el concepto de biorrefinería surge como una solución prometedora para el uso sostenible de los residuos de la cadena del camarón en la región Caribe colombiana, lo que permite el aprovechamiento integral de este recurso marino mediante la producción conjunta de carne de camarón, quitina, quitosano y astaxantina. La aplicación del concepto de biorrefinería a la cadena

productiva del camarón proporcionaría varias ventajas a este subsector tales como: i) alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible mediante la aplicación del concepto de economía circular, ii) añadir valor agregado a los residuos, lo cual aumentaría los beneficios netos y iii) reducir los residuos generados.

Como es de esperarse, es necesario conocer la factibilidad técnica y económica de la implementación de una biorrefinería de camarón en la región Caribe colombiana, así como su sostenibilidad bajo varios criterios. En este sentido, se puede aprovechar la Ingeniería de Procesos Asistida por Computador para el desarrollo de la topología de producción conjunta de quitina, quitosano, astaxantina y carne de camarón a escala piloto, mediante técnicas de modelación y simulación de procesos, y su evaluación bajo criterios de sostenibilidad mediante técnicas de análisis económico, ambiental energético, social y de seguridad de procesos apoyado en herramientas computacionales avanzadas y software especializado. Todos estos desarrollos son los que se muestran con mayor detalle en los capítulos posteriores de este libro.

Referencias

- Abd El-Hack, M., Saadony, M., Shafi, M., Zabermaawi, N., Arif, M., Batiha, G., Khafaga, A., Abd El-Hakim, Y. & Al-Sagheer, A. (2020). Antimicrobial and antioxidant properties of chitosan and its derivatives and their applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 2726–2744. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.08.153.
- Acosta, C. (2019). *Exportación de camarón de cultivo desde Colombia a Japón* [Trabajo de grado de pregrado, Colegio de Estudios Superiores de Administración]. Repositorio Colegio de Estudios

- Superiores de Administración – CESA. <https://repository.cesa.edu.co/bitstream/handle/10726/2261/ADM2019-27636.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- Agachi, P. (2014). Computer aided process engineering. *Proceedings of the Romanian Academy - series A*, 6(1).
- Ajao, O., Marinova, M., Savadogo, O. & Paris, J. (2018). Hemicellulose based integrated forest biorefineries: Implementation strategies. *Industrial Crops and Products*, 126, 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.10.025>.
- Aranaz, I., Acosta, N., Civera, C., Elorza, B., Mingo, J., Castro, C., Gandía, M. & Caballero, A. (2018). Cosmetics and cosmeceutical applications of chitin, chitosan and their derivatives. *Polymers*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/polym10020213>.
- Arya, S., Manohar, M. Singh, G. & Siddiqui, W. (2017). *Chitin and Chitosan-Complexes and Ther Applications*. Scrivener Publishing.
- Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E., Jessopp, M. & Loeb, V. (2009). A re-appraisal of the total biomass and annual production of Antarctic krill. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(5), 727–740. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2008.12.007>.
- Bamba, Y., Ogawa, Y., Saito, T., Berglund, L. & Isogai, A. (2017). Estimating the Strength of Single Chitin Nanofibrils via Sonication-Induced Fragmentation. *Biomacromolecules*, 18, 4405–4410. doi: 10.1021/acs.biomac.7b01467.
- Barikani, M., Oliaes, E., Seddiqi, H. & Honarkar, H. (2014). Preparation and application of chitin and its derivatives: a review. *Iranian Polymer Journal*, 23, 307–326. <https://doi.org/10.1007/s13726-014-0225-z>.
- Borić, M., Vicente, F., Jurković, D., Novak, U. & Likozar, B. (2020). Chitin isolation from crustacean waste using a hybrid demineralization/DBD plasma process. *Carbohydrate Polymers*, 246. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116648>.

- Castañeda, C., Fuente, N., Pacheco, R., Ortiz, T., y Barboza, J. (2011). Potencial de los quito-oligosacáridos generados de quitina y quitosina. *Acta Universitaria*, 21(3), 14-23.
- Chao, C., Yeh, H., Tsai, Y., Yuan, T., Liao, M., Huang, J. & Chen, H. (2020). Astaxanthin counteracts vascular calcification in vitro through an early up-regulation of SOD2 based on a transcriptomic approach. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(22), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijms21228530>.
- Charoenvuttitham, P., Shi, J. & Mittal, G. (2006). Chitin extraction from black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) waste using organic acids. *Separation Science and Technology*, 41(6), 1135–1153. <https://doi.org/10.1080/01496390600633725>.
- Chen J. & Kotani, K. (2016). Astaxanthin as a Potential Protector of Liver Function: A Review. *Journal of Clinical Medicine Research*, 8(10), 701–704. <http://dx.doi.org/10.14740/jocmr2672w>.
- Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1412–1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>.
- Cong, X., Miao, J., Zhang, H., Wei-Hong, S., Xing, L., Sol, L., Zu, L., Gao, V. & Leng, K. (2019). Effects of Drying Methods on the Content, Structural Isomers, and Composition of Astaxanthin in Antarctic Krill. *ACS Omega*, 4(19), 17972–17980. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b01294>.
- Croisier F. & Jérôme, C. (2013). Chitosan-based biomaterials for tissue engineering. *European Polymer Journal*, 49(4), 780–792, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2012.12.009>.
- Cusihuaman, S. (2017). Derivatización del quitosano para la obtención del carboximetilquitosano (O-Cmq) y su caracterización vía espectroscopía infrarroja (Ftir) y resonancia magnética nuclear (Rmn). Universidad Nacional de San Agustín, Perú.

- DANE. (2018). *Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/necesidades-basicas-insatisfechas-nbi>.
- DANE. (2019). *Cuentas nacionales departamentales: PIB por departamento*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>.
- Dave, D., Liu, Y., Pohling, J., Trenholm, S. & Murphy, W. (2020). Astaxanthin recovery from Atlantic shrimp (*Pandalus borealis*) processing materials. *Bioresour. Technol. Reports*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100535>.
- de Armas-Martínez, A., Morales, M., Albernas, Y. & González, E. (2019). Proyección de una industria azucarera para transformarse en una biorrefinería a partir de biocombustibles de segunda y tercera generación. *Tecnología Química*, 39(3), 489–507.
- de Oliveira, D., Peixoto, L., Sánchez-Cortés, S. & Andrade, G. (2016). Chitosan-based improved stability of gold nanoparticles for the study of adsorption of dyes using SERS. *Vibrational Spectroscopy*, 87, 8–13, <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2016.08.017>.
- de Souza, M., Sábio, R., Ribeiro, T., Dos Santos, A., Meneguín, A. & Chorilli, M. (2020). Highlighting the impact of chitosan on the development of gastroretentive drug delivery systems. *International Journal of Biological Macromolecules*, 159, 804–822. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.104>.
- Diwan, A., Harke, S. & Panche, A. (2022). Application of proteomics in shrimp and shrimp aquaculture. *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics*, 43. doi.org/10.1016/j.cbd.2022.101015.
- Ehrlich, H., Kaluzhnaya, O., Brunner, E., Tsurkan, M., Ereskovsky, A., Ilan, M., Tabachnick, K., Bazhenov, V., Paasch, S., Kammer, M., Born, R., Stelling, A., Galli, R., Belikov, S., Petrova, O., Sivkov, V., Vyalikhk, D., Hunoldt, S. & Wörheide, G. (2013). Identification and first insights

- into the structure and biosynthesis of chitin from the freshwater sponge *Spongilla lacustris*. *Journal of Structural Biology*, 183(3), 474–483. doi: 10.1016/j.jsb.2013.06.015.
- Espinoza, V. (2007). *Propiedades físicas y biológicas de dos tipos de esponjas de quitosano, para su aplicación como biomaterial* [Tesis de grado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Universidad Nacional Mayor San Marcos. https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/2803/Espinoza_ee.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Fakhri, S., Abbaszadeh, F., Dargahi, L. & Jorjani, M. (2018). Astaxanthin: A mechanistic review on its biological activities and health benefits. *Pharmacol Research*, 136, 1–20. doi: 10.1016/j.phrs.2018.08.012.
- FAO. (2020). Sistemas alimentarios y COVID-19 en América Latina y el Caribe: Impactos y oportunidades en la producción de alimentos frescos. *Boletín FAO/CEPAL Sistemas Alimentarios y COVID-19*, 11. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45897/1/cb0501_es.pdf.
- Galanopoulos, C., Kenkel, P. & Zondervan, E. (2019). Superstructure optimization of an integrated algae biorefinery. *Computers & Chemical Engineering*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106530>.
- Giraldo, J. y Reyes, D. (2022). *Desafíos y potencialidades de la obtención y aplicación de los materiales quitinosos*. Escuela de Ingeniería Ambiental, Instituto de Acuicultura, Universidad Austral de Chile, Sede Puerto Montt.
- Gómez-Ríos, D., Barrera-Zapata, R. & Ríos-Esteba, R. (2017). Comparison of process technologies for chitosan production from shrimp shell waste: A techno-economic approach using Aspen Plus®. *Food and Bioproducts Processing*, 103, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.02.010>.

- González, J. (2019). Producción local de camarón completó cuatro años al alza. *Agronegocios*. <https://goo.su/PEjdd>.
- González-Delgado, Á., Kafarov, V. & El-Halwagi, M. (2015). Development of a topology of microalgae-based biorefinery: process synthesis and optimization using a combined forward-backward screening and superstructure approach. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(8), 2213–2228. doi: 10.1007/s10098-015-0946-5.
- Gu, F., Geng, J., Li, M., Chang, J. & Cui, Y. (2019). Synthesis of Chitosan-Ignosulfonate Composite as an Adsorbent for Dyes and Metal Ions Removal from Wastewater. *ACS Omega*, 4(25), 21421–21430. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03128>
- Guagua, R. (2020). *Investigación de mercado para conocer la dinámica de comercialización de pescado y camarón titi en los municipios de Tumaco, Pasto, Popayán y Cali*. PDT Nariño.
- Hamed, I., Özogul, F. & Regenstien, J. (2016). Industrial applications of crustacean by-products (chitin, chitosan, and chitooligosaccharides): A review. *Trends in Food Science & Technology*, 8, 40–50. doi: 10.1016/j.tifs.2015.11.007.
- Hernández, D., Garzón, L., Colorado, O., Villamil J. y Táutica, J. (2020). *Proyecto Plan de Negocios Exportación de Camarones* [Trabajo de grado de pregrado, Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano]. Sistema Nacional de Bibliotecas SISNAB. <https://alejandria.poligran.edu.co/handle/10823/2957?show=full>.
- Ibrahim, H., Salama, M. & El-Banna, H. (1999). Shrimp's waste: Chemical composition, nutritional value and utilization. *Nahrung - Food*, 43(6), 418–423. doi.org/10.1002/(SICI)1521-3803(19991201)43:6<418::AID -FOOD418>3.0.CO;2-6.
- IMARC Group. (2020). *Shrimp Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2020-2025*.
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2011). *El ICA contribuye al desarrollo competitivo del sector camaronicultor*. <https://>

- www.ica.gov.co/noticias/pecuaria/2011/el-ica-contribuye-al-desarrollo-competitivo-del-se.
- Islam, S., Bhuiyan, M. & Islam, M. (2017). Chitin and Chitosan: Structure, Properties and Applications in Biomedical Engineering. *Journal of Polymers and the Environment*, 25(3), 854–866. doi: 10.1007/s10924-016-0865-5.
- Jayakumar, R., Prabakaran, M., Sudheesh Kumar, P., Nair, S. & Tamura, H. (2011). Biomaterials based on chitin and chitosan in wound dressing applications. *Biotechnology Advances*, 29(3), 322–337. doi: 10.1016/j.biotechadv.2011.01.005.
- Jiang, J., Zhang, J., Li, T., Zhang, X., Wang, Y., Xia, B., Huang, J., Fan, Y. & Dong, W. (2022). Facile route to tri-carboxyl chitin nanocrystals from di-aldehyde chitin modified by selective periodate oxidation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 211, 281–288. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.217>.
- Jones, M., Kujundzic, M., John, S. & Bismarck, A. (2020). Crab vs. Mushroom: A review of crustacean and fungal chitin in wound treatment. *Marine Drugs*, 18(1). <https://doi.org/10.3390/md18010064>
- Kafarov, V. & González-Delgado, Á. (2011). Microalgae based biorefinery: issues to consider. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 4(4), 5–22.
- Kandra, P. Challa, M. & Kalangi, H. (2012). Efficient use of shrimp waste: Present and future trends. *Applied Microbiology and Biotechnology* volume 93, 17–29. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3651-2>.
- Kumari, S., Rath, P., Sri Hari Kumar, A. & Tiwari, T. (2015). Extraction and characterization of chitin and chitosan from fishery waste by chemical method. *Environmental Technology & Innovation*, 3, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2015.01.002>.
- Liao J. & Huang, H. (2019). Magnetic chitin hydrogels prepared from *Hericium erinaceus* residues with tunable characteristics: A novel biosorbent for Cu²⁺ removal. *Carbohydrate Polymers*, 220, 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.05.074>.

- Lim, K., Yusoff, F., Shariff, M. & Kamarudin, M. (2018). Astaxanthin as feed supplement in aquatic animals. *Reviews in Aquaculture*, 10(3), 738–773. <https://doi.org/10.1111/raq.12200>.
- Lim, K., Yusoff, F., Shariff, M. & Kamarudin, M. (2019). Dietary administration of astaxanthin improves feed utilization, growth performance and survival of Asian seabass, *Lates calcarifer* (Bloch, 1790). *Aquaculture Nutrition*, 25(6), 1410–1421. <https://doi.org/10.1111/anu.12961>.
- Liska, A., Yang, H., Bremer, V., Klopfenstein, T., Walters, D., Erickson, G. & Cassman, K. (2009). Improvements in life cycle energy efficiency and greenhouse gas emissions of corn-ethanol. *Journal of Industrial Ecology*, 13(1), 58–74. doi: 10.1111/j.1530-9290.2008.00105.
- Lopes, C., Antelo, L., Franco-Uría, A., Alonso, A. & Pérez-Martín, R. (2018). Chitin production from crustacean biomass: Sustainability assessment of chemical and enzymatic processes. *Journal of Cleaner Production*, 172, 4140–4151. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.082>.
- Machmudah, S. Diono, W. Kanda, H. & Goto, M. (2018). Supercritical fluids extraction of valuable compounds from algae: Future perspectives and challenges. *Engineering Journal*, 22(5), 13–30. <https://doi.org/10.4186/ej.2018.22.5.13>.
- Maddaloni, M., Vassalini, I. & Alessandri, I. (2020). Green Routes for the Development of Chitin/Chitosan Sustainable Hydrogels. *Sustainable Chemistry*, 1(3), 325–344. <https://doi.org/10.3390/suschem1030022>
- Mao, X., Guo, N., Sun, J. & Xue, C. (2017). Comprehensive utilization of shrimp waste based on biotechnological methods: A review. *Journal of Cleaner Production*, 143, 814–823. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.042.
- Meramo-Hurtado, S., Alarcón-Suesca, C. & González-Delgado, Á. (2020). Exergetic sensibility analysis and environmental evaluation

- of chitosan production from shrimp exoskeleton in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119285>.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). *Estrategia de política para el sector de pesca y acuicultura*.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). *Acuicultura en Colombia, cadena de la Acuicultura*. Dirección de Cadenas Pecuarías, Pesqueras y Acuícolas.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). *Acuicultura en Colombia, cadena de la Acuicultura*. Dirección de Cadenas Pecuarías, Pesqueras y Acuícolas.
- Mohan, K., Muralisankar, T., Jayakumar, R. & Gandhi, C. (2021). A study on structural comparisons of α -chitin extracted from marine crustacean shell waste. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2. doi: 10.1016/j.carpta.2021.100037.
- Molino, A., Mehariya, S., Di Sanzo, G., Larocca, V., Martino, M., Leone, G., Marino, T., Chianese, S., Balducci, R. & Musmarrad, D. (2020). Recent developments in supercritical fluid extraction of bioactive compounds from microalgae: Role of key parameters, technological achievements and challenges. *Journal of CO2 Utilization*, 36, 196–209. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.11.014>.
- Moreno, J. (2019). *Estudio de viabilidad de una planta de producción de quitosano* [Trabajo fin de master, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/55989/1/TFM_Jaime_Moreno_de_la_Cruz.pdf.
- Moshkelani, M., Marinova, M., Perrier, M. & Paris, J. (2013). The forest biorefinery and its implementation in the pulp and paper industry: Energy overview. *Applied Thermal Engineering*, 50(2), 1427–1436. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.038>.
- Mularczyk, M., Michalak, I. & Marycz, K. (2020). Astaxanthin and other nutrients from haematococcus pluvialis—Multifunctional

- applications. *Marine Drugs*, 18(9), 1–22. <https://doi.org/10.3390/md18090459>.
- Nakano T. & Wiegertjes, G. (2020). Properties of Carotenoids in Fish Fitness: A Review. *Marine Drugs*, 18(11), 1–17. <https://doi.org/10.3390/md18110568>.
- Naseri, N., Algan, C., Jacobs, V., John, M., Oksman, K. & Mathew, A. (2014). Electrospun chitosan-based nanocomposite mats reinforced with chitin nanocrystals for wound dressing. *Carbohydrate Polymers*, 109, 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.03.031>.
- Nawawi, W., Jones, M., Murphy, R., Lee, K., Kontturi, E. & Bismarck, A. (2020). Nanomaterials Derived from Fungal Sources-Is It the New Hype? *Biomacromolecules*, 21(1), 30–55. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b01141>.
- Niizawa, I., Espinaco, B., Leonardi, J., Heinrich, J. & Sihufe, G. (2018). Enhancement of astaxanthin production from *Haematococcus pluvialis* under autotrophic growth conditions by a sequential stress strategy. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 48(6), 528–534. <https://doi.org/10.1080/10826068.2018.1466159>.
- Oyatogun, G., Esan, T., & Akinluwade, K. (2020). Chitin, chitosan, marine to market. In S. Gopi, S. Tomas & A. Pio. (Ed.), *Handbook of Chitin and Chitosan* (pp. 335–376). Elsevier.
- Pattanaik, S., Sawant, P., Xavier, K., Dube, K., Srivastava, P., Dhanabalan, V. & Chadha, N. (2020). Characterization of carotenoprotein from different shrimp shell waste for possible use as supplementary nutritive feed ingredient in animal diets. *Aquaculture*, 515. doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734594.
- Picos-Corrales, L., Sarmiento-Sánchez, J., Ruelas-Leyva, J., Crini, G., Hermosillo-Ochoa, E. & Gutierrez-Montes, J. (2020). Environment-Friendly Approach toward the Treatment of Raw Agricultural Wastewater and River Water via Flocculation Using Chitosan and

- Bean Straw Flour as Biofloculants. *ACS Omega*, 5(8), 3943–3951. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03419>.
- Preciado, D. (2022). *Extracción y caracterización de quitosano obtenido a partir de residuos del procesamiento de camarón *Penaeus monodon** [Trabajo de grado de pregrado, Universidad de los Andes]. Repositorio Universidad de Los Andes. <https://repositorio.unian-des.edu.co/handle/1992/58516>.
- Priharto, N., Ronsse, F., Prins, W., Carleer, R. & Heeres, H. (2020). Experimental studies on a two-step fast pyrolysis-catalytic hydrotreatment process for hydrocarbons from microalgae (*Nannochloropsis gaditana* and *Scenedesmus almeriensis*). *Fuel Processing Technology*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106466>.
- Puentes, V., Escobar, F. y Polo, C. *Estado de los principales recursos pesqueros 2014*. Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP).
- Qureshi, N., Hodge, D. & Vertes, A. (2014). *Biorefineries: Integrated Biochemical Processes for Liquid Biofuels*. Elsevier.
- Ranga, A., Siew, M., Sarada, V., Ravishanker, G. (2014). Astaxanthin: Sources, Extraction, Stability, Biological Activities and Its Commercial Applications—A Review. *Marine Drugs*, 12, 128-152. doi:10.3390/md12010128
- Rahman, M. & Halfar, J. (2014). First evidence of chitin in calcified coralline algae: New insights into the calcification process of *Clathromorphum compactum*. *Scientific Reports*, 4. doi: 10.1038/srep06162.
- Rasti, H., Parivar, K., Baharara, J., Iranshahi, M., & Namvar, F. (2016). Chitosan extracted from the Persian Gulf chiton shells: Induction of apoptosis in liver cancer cell line. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 15(4), 1362–1378. doi: 10.22092/ijfs.2018.114616.
- Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 31, 603–632. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>.

- Romero, A. y Pereira, J. (2020). Estado del arte: Quitosano, un biomaterial versátil. Estado del Arte desde su obtención a sus múltiples aplicaciones. *Revista INGENIERÍA UC*, 27(2), 118-135.
- Routray, W., Dave, D., Cheema, S., Ramakrishnan, V. & Pohling, V. (2019). Biorefinery approach and environment-friendly extraction for sustainable production of astaxanthin from marine wastes. *Critical Reviews in Biotechnology*, 39(4), 469-488. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1573798>.
- Routray, W., Dave, D., Cheema, S., Vegneshwaran, V. & Pohling, J. (2019). Biorefinery approach and environment-friendly extraction for sustainable production of astaxanthin from marine wastes. *Critical Reviews in Biotechnology*, 39, 469-488. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1573798>.
- Roy, J., Salaün, F., Giraud, S., Ferri, A., Chen, G. & Guan, J. (2017). Solubility of Chitin: Solvents, Solution Behaviors and Their Related Mechanisms. *Solubility of Polysaccharides*. doi: 10.5772/intechopen.71385.
- Saberi, R., Hassanisaadi, M., Vatankhah, M., Abdani, S. & Ait, E. (2022). Chitosan as potential natural compound to manage plant diseases. *International Journal of Biological Macromolecules*, 220, 998-1009. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.109>.
- Saborit, K. (2015). *Micropartículas porosas nanoestructuradas de quitosano acarreadoras de moléculas bioactivas* [Tesis de maestría, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo]. Repositorio CIAD. <https://ciad.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1006/64/1/Saborit%20Pino%20Karla%20Zuleika.pdf>.
- Saeedi, M., Vahidi, O., Reza, M., Ahmadi, S., Asadnia, M., Akhavan, O., Seidi, F., Rabie, M., Reza, M., Webster, T., Varma, R., Sharifi, E., Zarrabi, A. & Rabiee, N. (2022). Customizing nano-chitosan for sustainable drug delivery. *Journal of Controlled Release*, 350, 175-192. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2022.07.038>.

- Salan, T. (2017). A Brief Review of the Thermochemical Platform as a Promising Way to Produce Sustainable Liquid Biofuels in Biorefinery Concept. *Petroleum and Petrochemical Engineering Journal*, 1(3). doi: 10.23880/ppej-16000123.
- Saravana, P., Ho, T., Chae, S., Cho, Y., Park, J., Lee, H. & Chun, B. (2018). Deep eutectic solvent-based extraction and fabrication of chitin films from crustacean waste. *Carbohydrate Polymers*, 195, 622–630. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.05.018>.
- Sarma, S., Ayadi, M. & Brar, S. (2010). Biorefinery: General overview. In S. Brar, S. Sarma & K. Pakshirajan, *Platform Chemical Biorefinery* (pp. 21-31). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802980-0.00002-X>
- Shah, M., Liang, Y., Cheng, J. & Daroch, M. (2016). Astaxanthin-producing green microalga *Haematococcus pluvialis*: From single cell to high value commercial products. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00531>.
- Sharma, N., Modak, C., Singh, P., Kumar, R., Khatri, D. & Singh, S. (2021). Underscoring the immense potential of chitosan in fighting a wide spectrum of viruses: A plausible molecule against SARS-CoV-2? *International Journal of Biological Macromolecules*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.090>.
- Tuan, Z., Mohd, S., Syuhada, N., Nursabriena F. & Azwanida, N. (2022). Effects of dietary astaxanthin enrichment on enhancing the colour and growth of red tilapia. *Oreochromis sp. Aquaculture and Fisheries*. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.06.001>.
- Vargas-Mira, A., Zuluaga-García, C. & González-Delgado, Á. (2019). A Technical and Environmental Evaluation of Six Routes for Industrial Hydrogen Production from Empty Palm Fruit Bunches. *ACS Omega*, 4(13), 15457–15470.
- Vaz Rossell, C., Mantelatto, P., Agnelli, J. & Nascimento, J. (2008). Sugar-based Biorefinery - Technology for Integrated Production of

- Poly(3-hydroxybutyrate), Sugar, and Ethanol. In B. Kamm, P. Gruber, & M. Kamm. (Ed.), *Biorefineries-Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions* (pp. 209–226). Wiley VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527619849.ch10>.
- Vilches A. y Gil, D. (2016). Proyección de una industria azucarera para transformarse en una biorrefinería a partir de biocombustibles de segunda y tercera generación. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 13(2), 395-407.
- Wang, D., Feng, J., Yu, C., Zhang, X., Chen, J., Wei, L., Liu, Z., Ouyang, L., Zhang, L., Hua, Q. & Liu, F. (2022). Integrated pathway engineering and transcriptome analysis for improved astaxanthin biosynthesis in *Yarrowia lipolytica*. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 7, 1133–1141. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2022.08.001>.
- Wang, F., Gao, B., Wu, M., Huang, L. & Zhang, V. (2019). A novel strategy for the hyper-production of astaxanthin from the newly isolated microalga *Haematococcus pluvialis* JNU35. *Algal Research*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101466>.
- Wu, L., Li, L., Chen, S., Wang, L. & Lin, X. (2020). Deep eutectic solvent-based ultrasonic-assisted extraction of phenolic compounds from *Moringa oleifera* L. leaves: Optimization, comparison and antioxidant activity. *Separation and Purification Technology*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117014>.
- Xiu, S., Zhang, B. & Shahbazi, A. (2011). Biorefinery Processes for Biomass Conversion to Liquid Fuel. In M. Dos Santos. (Ed.), *Biofuel's Engineering Process Technology* (pp. 167-190). Intech Open. doi: 10.5772/16417.
- Yang, T. Chou, C. & Li, C. (2005). Antibacterial activity of N-alkylated disaccharide chitosan derivatives. *International Journal of Food Microbiology*, 97(3), 237–245. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(03\)00083-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(03)00083-7).

- Yen, M. & Mau, J. (2007). Selected physical properties of chitin prepared from shiitake stipes. *LWT - Food Science and Technology*, 40(3), 558–563. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.10.008>.
- Younes, I., Hajji, S., Frachet, V., Rinaudo, M., Jellouli, K. & Nasri, M. (2014). Chitin extraction from shrimp shell using enzymatic treatment. Antitumor, antioxidant and antimicrobial activities of chitosan. *International Journal of Biological Macromolecules*, 69, 489–498. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.06.013>.
- Zhang, Q., Xiang, Q. & Li, Y. (2022). One-step bio-extraction of chitin from shrimp shells by successive co-fermentation using *Bacillus subtilis* and *Lactobacillus plantarum*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103057>.
- Zhang, X., Zhang, C., Zhou, M., Xia, Q., Fan, L. & Zhao, L. (2022). Enhanced bioproduction of chitin in engineered *Pichia pastoris*. *Food Bioscience*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101606>.
- Zuorro, A., Moreno, K. & González, A. (2021). Evaluating the feasibility of a pilot-scale shrimp biorefinery via techno-economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128740>.



Capítulo II.

Desarrollo de una biorrefinería de camarón en la región Caribe colombiana mediante modelado y simulación de procesos

La simulación de procesos es una herramienta muy potente que posibilita la evaluación y el análisis de procesos existentes y emergentes, permite estudiar el efecto de la modificación de las variables y parámetros sobre el comportamiento de los sistemas con el objetivo de conseguir la mejor configuración del proceso con costos mínimos, máxima eficiencia y productividad, con resultados reproducibles (Himmelblau y Bischoff, 1976). Por su parte, el modelado de procesos permite una aproximación de la realidad. Un modelo lleva a diferentes abstracciones de acuerdo con el objetivo deseado, incorporando una cantidad de detalles con respecto al proceso real (Koulouris et al., 2021). Por lo tanto, es importante especificar inicialmente el objetivo del modelo, definir las corrientes de masa y energía, la estructura interna del sistema y desarrollar el diagrama de flujo del proceso antes de la simulación.

El modelado de procesos y la simulación asistida por computador están creciendo enormemente gracias a los resultados exitosos que se han conseguido en el desarrollo industrial para diseñar, analizar y optimizar procesos industriales (Kancherla et al., 2021). Un simulador de procesos es un software que permite al usuario representar y analizar fácilmente topologías de procesamiento

(Koulouris et al., 2021). Dentro de los principales simuladores comerciales de procesos se incluyen: Aspen Plus, Aspen HYSYS, ChemCAD, UniSim Design, SuperPro Designer, Promax, ProSimPlus, entre otros. Todos estos simuladores poseen las características de haber sido diseñados para modelar principalmente procesos continuos y de comportamiento estable y transitorio (Koulouris et al., 2021). Estas herramientas han sido ampliamente usadas dentro de la mejora de procesos estructurales, desarrollo de alternativas de procesos existentes, desarrollo de procesos conceptuales, valorización de residuos, eliminación de cuellos de botella y como primer escalón en el análisis de procesos bajo criterios de sostenibilidad.

La herramienta computacional Aspen (Advanced System for Process Engineering, por sus siglas en inglés) es un simulador de procesos y un sistema para evaluaciones energéticas y económicas, desarrollado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts, y actualmente bajo el nombre Aspen Plus, es propiedad de la compañía AspenTech. El software Aspen Plus se emplea cuando se tienen procesos de diseño por lotes y continuos que manejen sólidos, líquidos y gases (Evans et al., 1979).

Una de las claves de una simulación exitosa de procesos es el cálculo acertado de las propiedades termodinámicas y termo-físicas de las sustancias puras y mezclas en distintos estados de agregación que hacen parte del proceso de modelado, lo cual se logra con la selección de los modelos termodinámicos adecuados que representen el comportamiento de las mezclas con respecto a cambios en la temperatura, presión y volumen (PVT) de los sistemas, en distintas etapas del proceso, tanto en fase vapor (mediante ecuaciones de estado), como en fase líquida (mediante modelos de coeficiente de actividad o modelos de solución). La selección del método termodinámico adecuado es fundamental en la simulación de procesos para evitar resultados erróneos. Cada método

de propiedades en el sistema de propiedades físicas del software Aspen Plus está basado en el método de la ecuación de estado o en el método del coeficiente de actividad para el cálculo del equilibrio de fases. El método seleccionado determina cómo se calculan otras propiedades termodinámicas y termo-físicas (Durán-García, y Ruiz-Navas, 2020; Bautista, 2020; Smith et al., 1995).

El método de la ecuación de estado está dado por las ecuaciones 2.1 y 2.2. para las fases vapor y líquido respectivamente.

$$f_i^V = \varphi_i^V y_i p \quad (2.1)$$

$$f_i^L = \varphi_i^L x_i p \quad (2.2)$$

Donde f_i^V y f_i^L es la fugacidad del componente i en la fase vapor y en la fase líquida respectivamente, φ es el coeficiente de fugacidad de la especie i , calculado mediante la ecuación 2.3, α es la fase del sistema, V es el volumen extensivo total, n_i es el número de moles del componente i y Z es el factor de compresibilidad (Hu et al., 2008).

$$\ln \varphi_i^\alpha = -\frac{1}{RT} \int_\infty^{V^\alpha} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial n_i} \right)_{T,V,n_{i \neq j}} - \frac{RT}{V} \right] dV - \ln Z_m^\alpha \quad (2.3)$$

Las ecuaciones 2.1 y 2.2 son idénticas, pero la fase a la que se aplican las variables varía. El coeficiente de fugacidad φ_i^α es obtenido a partir de una ecuación de estado que se encuentra implícita en la ecuación 2.3.

Por otro lado, el método del coeficiente de actividad está dado por las ecuaciones 2.4 y 2.5. para las fases vapor y líquido respectivamente.

$$f_i^v = \varphi_i^v y_i p \quad (2.4)$$

$$f_i^l = x_i \gamma_i f_i^{*,1} \quad (2.5)$$

Donde el coeficiente de fugacidad de la especie i en la fase vapor φ_i^v se calcula por medio de la ecuación 2.3, γ_i es el coeficiente de actividad del componente i , $f_i^{*,1}$ es la fugacidad del componente i como sustancia pura, de acuerdo con la ley de Lewis-Randall (Bautista, 2020; Diminan, 2003).

Con el método de la ecuación de estado, todas las propiedades termodinámicas pueden ser derivadas para ambas fases. Usando el método del coeficiente de actividad, las propiedades de la fase vapor son derivadas a partir de la ecuación de estado, de la misma forma que con el método de la ecuación de estado. Sin embargo, las propiedades de líquido se determinan como la sumatoria de las propiedades de los componentes puros a los que un término de mezcla o un término exceso se añade (Bautista, 2020; Diminan, 2003).

Para seleccionar el correcto modelo de propiedades en el software Aspen Plus se consideran cuatro factores: la naturaleza de las propiedades de interés, la composición de la mezcla, los rangos de presión y temperatura y la disponibilidad de los parámetros (Carlson, 1996). Algunos de los modelos termodinámicos disponibles en el simulador se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Modelos de propiedades termodinámicas disponibles en un simulador

Modelos de ecuación de estado	Modelos de coeficiente de actividad	Modelos especiales
Lee-Kesler (LK)	NRTL Electrolito	Braun K-10
Lee-Kesler-Plocker	NRTL	Chao-Seader
Peng-Robinson	UNIQUAC	Grayson-Streed
Predictive SRK	UNIFAC	Kent-Eisenberg
Redlich-Kwong	Van Laar	Tablas de vapor
Soave- Redlich-Kwong (RKS)	Wilson Flory-Huggins	
Ley de los gases ideales		

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta la descripción de los modelos de coeficiente de actividad y ecuaciones de estado más utilizados en simulación de procesos.

2.1 Modelos de coeficiente de actividad y ecuaciones de estado

2.1.1. Modelo de Wilson

La ecuación de Wilson se desprende de la teoría de las composiciones locales, su importancia y versatilidad radica en que contiene solamente dos parámetros, tanto para un sistema binario como para sistemas multicomponente, por lo cual se pueden analizar mezclas de muchas sustancias considerando simplemente la interacción entre pares de moléculas; este modelo se puede

describir como indican las ecuaciones 2.6 y 2.7. Es recomendado para sistemas no ideales, especialmente sistemas agua-alcohol.

$$\frac{G^E}{RT} = - \sum_i x_i \ln \sum_j x_j \Lambda_{ij} \quad (2.6)$$

$$\ln \gamma_i = 1 - \ln \sum_j x_j \Lambda_{ij} - \sum_j \frac{x_j \Lambda_{ji}}{\sum_k x_k \Lambda_{jk}} \quad (2.7)$$

Donde $\Lambda_{ji}=1$ para $i=j$. Para cada par ij hay dos parámetros debido a que $\Lambda_{ji} \neq \Lambda_{ij}$. Por ejemplo, para un sistema ternario los tres pares posibles ij están asociados con los parámetros $\Lambda_{12}, \Lambda_{21}$; $\Lambda_{13}, \Lambda_{31}$; $\Lambda_{23}, \Lambda_{32}$. Cada uno de estos parámetros está dado por las ecuaciones 2.8 y 2.9.

$$\Lambda_{ij} = \frac{V_j}{V_i} \exp \left(- \frac{\lambda_{ij} - \lambda_{ii}}{RT} \right) \quad (2.8)$$

$$\Lambda_{ji} = \frac{V_i}{V_j} \exp \left(- \frac{\lambda_{ji} - \lambda_{jj}}{RT} \right) \quad (2.9)$$

Donde V_i es el volumen molar del componente puro a la temperatura del sistema, λ_{ij} , λ_{ji} son constantes para un determinado par de componentes (independientes de la temperatura y composición (Wilson, 1963).

2.1.2. Modelo NRTL (Non-Random Two-Liquid)

El modelo NRTL de Renon y Prausnitz fue derivado para la determinación de coeficientes de actividad para fases líquidas (Bautista, 2020). Este modelo es aplicable a sistemas parcialmente miscibles y es recomendado en sistemas químicos altamente no ideales, donde se tengan mezclas de sustancias polares y no polares.

La ecuación NRTL contiene tres parámetros para un sistema multicomponente y se escribe como indican las ecuaciones 2.10–2.15.

$$\frac{G^E}{RT} = \sum_i x_i \frac{\sum_j x_j \tau_{ji} G_{ji}}{\sum_k x_k G_{ki}} \quad (2.10)$$

$$G_{ji} = \exp(-\alpha \tau_{ji}) \quad (2.11)$$

$$\tau_{ji} = \frac{b_{ji}}{RT} \quad (2.12)$$

$$b_{ji} = \lambda_{ji} - \lambda_{ij} \quad (2.13)$$

$$\alpha_{ij} = c_{ji} + d_{ji}(T - 273.15) \quad (2.14)$$

$$\ln \gamma_i = \frac{\sum_j x_j \tau_{ji} G_{ji}}{\sum_k x_k G_{ki}} + \sum_j \left(\frac{x_j G_{ij}}{\sum_k x_k G_{kj}} \left(\tau_{ij} - \frac{\sum_m x_m \tau_{mj} G_{mj}}{\sum_k x_k G_{kj}} \right) \right) \quad (2.15)$$

Donde G_{ji} es el coeficiente de NRTL, $G_{ji} = 1$ si $i = j$; τ_{ji} es un parámetro del modelo NRTL, donde $\tau_{ji} = 0$ si $i = j$; λ_{ji} es la energía de interacción entre el par de moléculas ij $\lambda_{ji} = \lambda_{ij}$; α_{ij} es la constante de no aleatoriedad de las interacciones binarias ij ; c_{ji} y d_{ji} son los parámetros binarios c y d que pueden determinarse a partir de la regresión de datos equilibrio líquido-vapor (VLE) y/o equilibrio líquido-líquido (LLE), R es la constante de los gases en las unidades apropiadas y T es la temperatura del sistema. Simplificando las ecuaciones 2.10 y 2.15 para una mezcla binaria, se obtienen las ecuaciones 2.16–2.18 (Renon & Prausnitz, 1968).

$$\frac{G^E}{x_1 x_2 RT} = \frac{\tau_{21} G_{21}}{x_1 + x_2 G_{21}} + \frac{\tau_{12} G_{12}}{x_1 G_{12} + x_2} \quad (2.16)$$

$$\ln(\gamma_1) = x_2^2 \left[\tau_{21} \left(\frac{G_{21}}{x_1 + x_2 G_{21}} \right)^2 + \frac{\tau_{12} G_{12}}{(x_2 + x_2 G_{12})^2} \right] \quad (2.17)$$

$$\ln(\gamma_2) = x_1^2 \left[\tau_{12} \left(\frac{G_{12}}{x_1 + x_2 G_{12}} \right)^2 + \frac{\tau_{2,1} G_{21}}{(x_1 + x_2 G_{21})^2} \right] \quad (2.18)$$

2.1.3. Modelo UNIQUAC (Universal QUasi Chemical Equation)

El modelo UNIQUAC incluye un término “universal” que da una idea del propósito que se buscaba al desarrollar el mismo, es decir, lograr una ecuación universal para todas las mezclas. Pretende representar moléculas significativamente diferentes entre sí en forma y tamaño, y también tener en cuenta las diferencias de polaridad. Este modelo también se basa en la composición local, al igual que Wilson y NRTL, pero en lugar de utilizar una fracción molar local, utiliza una fracción de área local θ_{ij} como variable principal de la concentración, lo cual permite su aplicabilidad en macromoléculas. Se recomienda para sistemas químicos altamente no ideales y cuando se tengan polímeros y otros sistemas auto asociativos (Anderson & Prausnitz, 1978).

En el modelo UNIQUAC, la energía de Gibbs de exceso incluye una parte combinatoria y una parte residual, como muestra la ecuación 2.19. La parte combinatoria describe las diferencias de tamaño y forma de las moléculas de la mezcla, mientras que la parte residual describe las interacciones energéticas de las moléculas. El modelo se representa con las ecuaciones 2.19–2.27 (Anderson & Prausnitz, 1978).

$$\frac{G^E}{RT} = \frac{G_{\text{combinatorial}}^E}{RT} + \frac{G_{\text{Residual}}^E}{RT} \quad (2.19)$$

$$\frac{G_{\text{combinatorial}}^E}{RT} = \sum_i x_i \ln \frac{\Phi_i}{x_i} + \frac{z}{2} \sum_i x_i q_i \ln \frac{\theta_i}{\Phi_i} \quad (2.20)$$

$$\frac{G_{\text{Residual}}^E}{RT} = - \sum_i x_i q'_i \ln \sum_j \theta'_j \tau_{ji} \quad (2.21)$$

$$\tau_{ji} = \exp \left[\frac{-(u_{ji} - u_{ii})}{RT} \right] = \exp \left[\frac{-a_{ji}}{T} \right] \quad (2.22)$$

$$\Phi_i = \frac{r_i x_i}{\sum_j r_j x_j} \quad (2.23)$$

$$\theta_i = \frac{q_i x_i}{\sum_j q_j x_j} \quad (2.24)$$

$$\theta'_i = \frac{q'_i x_i}{\sum_j q'_j x_j} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \ln \gamma_i &= \ln \left(\frac{\Phi_i}{x_i} \right) + \left(\frac{z}{2} \right) q_i \ln \left(\frac{\theta_i}{\Phi_i} \right) + l_i - \left(\frac{\Phi_i}{x_i} \right) \sum_j x_j l_j \\ &\quad - q'_i \ln \sum_j \theta'_j \tau_{ji} + q'_i \\ &\quad - q'_i \sum_j \left(\frac{\theta'_j \tau_{ij}}{\sum_k \theta'_k \tau_{kj}} \right) \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$l_j = \left(\frac{z}{2} \right) (r_j - q_j) - (r_j - 1) \quad (2.27)$$

Donde ϕ_i es la fracción de volumen del componente i en el coeficiente de actividad; θ_i es la fracción de área del componente i en la contribución combinatoria al coeficiente de actividad; θ'_i es la fracción de área del componente i en la contribución residual al coeficiente de actividad; z es el número de coordinación de retículo (definido como 10); τ_{ij} , τ_{ji} son los parámetros binarios UNIQUAC, en este caso $\tau_{ii} = \tau_{jj} = 1$; r_i es el parámetro de volumen relativo del

componente i ; es el parámetro de superficie molecular-geométrica del componente i para la parte combinatoria y q'_i es el parámetro de superficie de interacción molecular para el componente i de la parte residual (Anderson & Prausnitz, 1978).

2.1.4. Modelo UNIFAC

En este método los coeficientes de actividad se calculan a partir de las contribuciones de los distintos grupos funcionales que componen las moléculas de una solución. La aplicación del modelo UNIFAC se basa en la idea de que una solución se compone de grupos funcionales y no de las propias moléculas; al igual que el modelo UNIQUAC, el coeficiente de actividad viene dado por una parte combinatoria y una parte residual, y se describe mediante las ecuaciones 2.28–2.38 (Fredenslund et al., 1975).

$$\ln \gamma_i^c = 1 - J_i + \ln J_i - 5q_i \left(1 - \frac{J_i}{L_i} + \ln \frac{J_i}{L_i} \right) \quad (2.28)$$

$$J_i = \frac{r_i}{\sum_j r_j x_j} \quad (2.29)$$

$$L_i = \frac{q_i}{\sum_j q_j x_j} \quad (2.30)$$

$$q_i = \sum_k v_k^{(i)} Q_k \quad (2.31)$$

$$r_i = \sum_k v_k^{(i)} R_k \quad (2.32)$$

$$\ln \gamma_i^R = q_i \left[1 - \sum_k \left(\theta_k \frac{\beta_{ik}}{s_k} - e_{ki} \ln \frac{\beta_{ik}}{s_k} \right) \right] \quad (2.33)$$

$$\theta_k = \frac{\sum_i x_i q_i e_{ki}}{\sum_j x_j q_j} \quad (2.34)$$

$$e_{ki} = \frac{v_k^{(i)} Q_k}{q_i} \quad (2.35)$$

$$s_k = \sum_m \theta_m \tau_{mk} \quad (2.36)$$

$$\beta_{ik} = \sum_m e_{mi} \tau_{mk} \quad (2.37)$$

$$\tau_{mk} = \exp \frac{-a_{mk}}{T} \quad (2.38)$$

Donde $v_k^{(i)}$ es el número del grupo funcional k en la i -ésima especie molecular; k es el grupo funcional; Q_k es el parámetro de área del grupo funcional k ; R_k es el parámetro de volumen del grupo funcional k ; r_i es el parámetro de volumen del componente puro i ; q_i es el parámetro de área del componente puro i .

El modelo UNIFAC resulta conveniente de utilizar en sistemas de comportamiento no ideal, en soluciones conformadas por compuestos orgánicos y mezclas no poliméricas a presiones bajas o moderadas a temperaturas entre los 300 y 425 K. Sin embargo, no es adecuado para mezclas que contengan electrolitos (Fredenslund et al., 1975).

2.1.5. Ecuación de estado Redlich Kwong

Esta ecuación de estado es muy precisa para temperaturas superiores a la temperatura del punto crítico y representa bien el comportamiento de moléculas pequeñas no polares. Sin embargo, pierde precisión al describir el comportamiento PVT de la fase

líquida y cuando el compuesto estudiado presenta enlaces con átomos de hidrógeno. Esta ecuación también es recomendable para calcular las propiedades de la fase vapor cuando el cociente entre la presión del sistema, y la presión crítica de la sustancia sean menores que el cociente entre la temperatura y la temperatura crítica de la sustancia. El modelo de Redlich Kwong está dado por las ecuaciones 2.39–2.41, donde P es la presión del sistema; R la constante universal de los gases en las unidades apropiadas; V es el volumen molar; a y b son constantes positivas cuyo valor depende de cada fluido, T_c es la temperatura crítica de la sustancia y P_c es la presión crítica de la sustancia (Redlich & Kwong, 1948).

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{T^{1/2} V(V + b)} \quad (2.39)$$

$$a = \frac{0,42748R^2T_c^{2.5}}{P_c} \quad (2.40)$$

$$b = \frac{0.08664RT_c}{P_c} \quad (2.41)$$

2.1.6. Ecuación de estado Soave -Redlich-Kwong

La ecuación de estado de Soave Redlich Kwong está dada por la ecuación 2.42 y corresponde a la modificación realizada por Soave a la ecuación de Redlich Kwong. La modificación implica una función más compleja para la temperatura en el segundo término (α) con el fin de ajustar los datos de la presión de vapor de hidrocarburos, e incluye el factor acéntrico que, es una medida de la no esfericidad de las moléculas. Esta ecuación se hace más precisa al ser utilizada para describir el comportamiento PVT de hidrocarburos. Sin embargo, la función α sigue teniendo inconvenientes para el

hidrógeno, por lo cual se modifica si la ecuación SRK se va a utilizar para esta sustancia, quedando la ecuación 2.47 (Wilson, 1966).

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a\alpha}{V(v + b)} \quad (2.42)$$

$$a = \frac{0,42748R^2T_c^{2.5}}{P_c} \quad (2.43)$$

$$b = \frac{0.08664RT_c}{P_c} \quad (2.44)$$

$$\alpha = [1 + m(1 - T_r^{0.5})]^2 \quad (2.45)$$

$$m = 0,48 + 1,57\omega - 0,176\omega^2 \quad (2.46)$$

Para el hidrógeno:

$$\alpha = 1,202 \exp(-0,30288T_r) \quad (2.47)$$

Donde P es la presión del sistema; R la constante universal de los gases en las unidades apropiadas; V es el volumen molar; a y b son constantes positivas cuyo valor depende de cada fluido, T_c es la temperatura crítica de la sustancia, P_c es la presión crítica de la sustancia, T_r es la temperatura reducida y ω es el factor acéntrico (Nguyen, 2009).

2.1.7. Ecuación de estado Peng Robinson

La ecuación de Peng-Robinson es muy efectiva para calcular las densidades de especies químicas en fase líquida de muchas sustancias, aunque tiene una mayor precisión si estos líquidos son no polares. Además, es aplicable para todos los cálculos de las propiedades de un fluido en procesos que involucran gas natural,

por tanto, es ampliamente usada en la industria del petróleo. Esta ecuación también es muy precisa para determinar el comportamiento PVT de sustancias a condiciones cercanas al punto crítico. Está dada por las ecuaciones 2.48–2.52.

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a\alpha}{V^2 + 2Vb - b^2} \quad (2.48)$$

$$a = \frac{0,45724R^2T_c^{2.5}}{P_c} \quad (2.49)$$

$$b = \frac{0,07780RT_c}{P_c} \quad (2.50)$$

$$\alpha = [1 + m(1 - T_r^{0,5})]^2 \quad (2.51)$$

$$m = 0,37464 + 1,54226\omega - 0,26992\omega^2 \quad (2.52)$$

Donde P es la presión del sistema; R la constante universal de los gases en las unidades apropiadas; V es el volumen molar; a y b son constantes positivas cuyo valor depende de cada fluido, T_c es la temperatura crítica de la sustancia, P_c es la presión crítica de la sustancia, T_r es la temperatura reducida y ω es el factor acéntrico (Turban, 2020).

2.2. Investigaciones recientes en modelado y simulación de bioprocesos y biorrefinerías asistida por computador

Las herramientas de modelado y la simulación de procesos han sido ampliamente usadas por investigadores. Topologías emergentes y procesos existentes han sido modelados y simulados a través de varios softwares de simulación con el objetivo de evaluar

diferentes aspectos, identificar puntos críticos y proponer mejoras. Oregionni et al. (2017) utilizaron el software gPROMS para simular y realizar el análisis tecno-económico de la producción de biometano a partir de residuos de la agricultura y la industria alimentaria. Kotoupas et al. (2007) por su parte, emplearon SuperPro Designer para comparar cinco escenarios alternativos para el tratamiento de las aguas residuales de una fábrica de queso cheddar desde el punto de vista ambiental. Missailidis et al. (2009) emplearon este mismo software para simular la producción de arabinoxialanos en el contexto de una biorrefinería de trigo destinada principalmente a la producción de bioetanol, mientras que Arora et al. (2018) usaron esta herramienta para realizar la evaluación económica de una biorrefinería de residuos de procesamiento integrado de mango. Gómez et al. (2022) utilizaron SuperPro Designer para simular una biorrefinería de plátano para producir bloques de alimentación suplementaria, ensilaje y bloques fermentados, productos que se utilizan para alimentar ganado lechero. El software Aspen Plus fue utilizado por Larbi et al., (2018) para simular y evaluar la viabilidad económica del proceso de producción de nanomateriales de quitina considerando todos los procedimientos que desarrollaron a escala de laboratorio. Liu et al. (2021) también usaron Aspen para simular una biorrefinería de maíz para la producción de bioetanol, xilosa, electricidad y vapor. En su estudio además de la simulación de procesos realizaron análisis económico, análisis pinch y análisis de ciclo de vida.

Por otro lado, en la literatura también se encuentran algunas investigaciones relacionadas con el modelado y simulación de procesos de conversión de residuos de camarón en productos de valor agregado. En la tabla 2.2 se resumen algunas contribuciones relevantes, varias de ellas realizadas previamente por los autores de este libro.

Tabla 2.2. Trabajos recientes sobre aprovechamiento de camarón

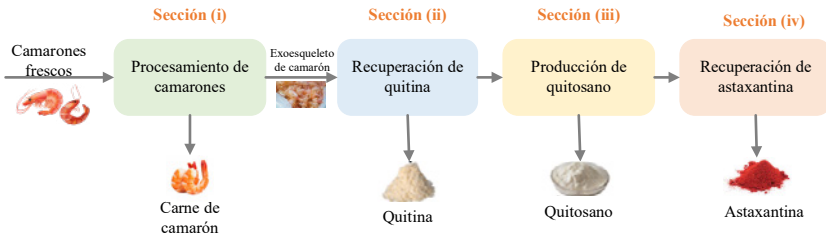
Bioproductos obtenidos	Modelado del proceso	Simulación del proceso	Fuente
Astaxantina; Quitina/ quitosano; hidrolisado de proteínas	x		Routray et al. (2019)
Quitina; minerales; proteínas	x		Bradić et al. (2020)
Quitina; quitosano; astaxantina	x		Meramo-Hurtado & González-Delgado (2019)
Quitina/quitosano; carbonato de calcio; biopolímero	x		Sieber et al. (2018)
Quitina; quitosano; astaxantina; carne de camarón	x	x	Este libro

Fuente: elaboración propia.

2.3. Descripción general del proceso modelado

La biorrefinería de camarón a escala piloto propuesta para la región Caribe colombiana incluye cuatro secciones principales, como se muestra en la figura 2.1: (i) Procesamiento de camarones, (ii) recuperación de quitina, (iii) producción de quitosano y (iv) recuperación de astaxantina. Con base en la información reportada en el capítulo 1 acerca de la producción de camarón y residuos en la región Caribe colombiana (González, 2019), se seleccionó una capacidad de procesamiento de 469.22 kg/h de camarones frescos.

Figura 2. Secciones de procesamiento de la topología de biorrefinería de camarón

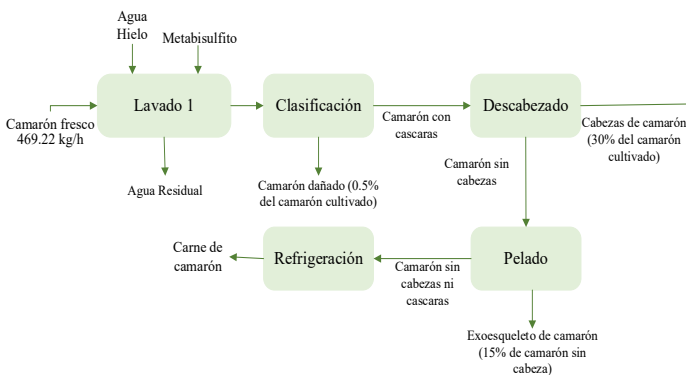


Fuente: elaboración propia.

2.3.1. Sección (i): Procesamiento de camarones

Los camarones frescos se alimentan a la primera sección, donde se lavan con agua y metabisulfito de sodio para eliminar impurezas y evitar la melanosis de los camarones (Nirmal & Benjakul, 2011). En seguida, los camarones dañados o manchados son desechados en la unidad de clasificación. Las cabezas y el exoesqueleto de los camarones se eliminan en las etapas de descabezado y pelado, respectivamente, para obtener la carne de camarón.

Figura 2.2. Diagrama de bloques de la sección de procesamiento de camarones



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, la carne se envía para su refrigeración y posterior comercialización, mientras que el exoesqueleto de camarones pasa a la sección (ii). La temperatura en todas las etapas de esta primera sección se mantiene alrededor de los 9°C para conservar la carne en buen estado. Además, aproximadamente el 35 % – 45 % de la masa del camarón se elimina en las cáscaras y cabezas (Zuorro et al., 2021; Moreno et al., 2021). El diagrama de bloques de la sección se presenta en la figura 2.2.

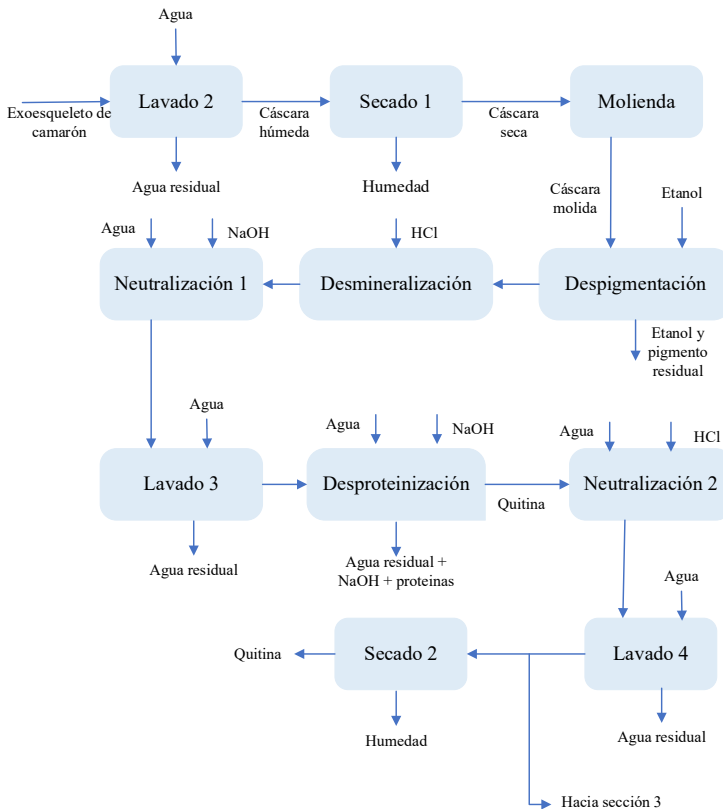
2.3.2. Sección (ii): Recuperación de quitina

El exoesqueleto de camarón se somete inicialmente a un pretratamiento que incluye lavado, secado y molienda para eliminar impurezas y reducir su tamaño hasta un polvo de 0,5 mm. En seguida, el exoesqueleto tratado se envía a la unidad de despigmentación donde se extrae la astaxantina mediante la adición de etanol al 85 % (Bonfante-Álvarez et al., 2018). La mezcla de pigmentos y etanol residual pasa a la sección de recuperación de astaxantina, mientras que el material despigmentado va a la etapa de desmineralización.

En la desmineralización se eliminan los minerales (CaCO_3 , Na_2CO_3 , MgCO_3) por la adición de una solución de HCl 1,5M (Srinivasan et al., 2018). Luego de la reacción de desmineralización, la corriente principal se neutraliza con NaOH y se lava para mantener el pH neutro (Moreno-Sader et al., 2020). En seguida, las proteínas presentes en el exoesqueleto del camarón se eliminan en la unidad de desproteínización añadiendo una solución de hidróxido de sodio (Cogollo-Herrera et al., 2018). La quitina extraída de esta etapa se neutraliza con HCl y se lava para ajustar su pH a 7 (Monter-Miranda et al., 2016). La mitad de la quitina obtenida se envía a un secado para su disposición final; mientras el resto va a la

sección de producción de quitosano. En la figura 2.3 se muestra el diagrama de bloques para esta sección.

Figura 2.3. Diagrama de bloques de la sección de recuperación de quitina



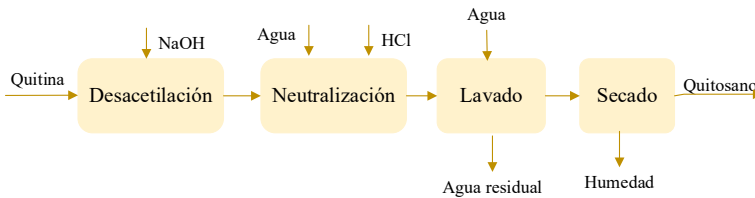
Fuente: elaboración propia.

2.3.3. Sección (iii): Producción de quitosano

La quitina se transforma en quitosano por la eliminación de los grupos acetilo en un proceso de desacetilación; en esta etapa se requieren altas temperaturas y una gran concentración de

hidróxido de sodio para que se efectuó la reacción (Abadir et al., 2019). En seguida, el quitosano obtenido se envía a las etapas de neutralización con HCl y lavado para ajustar su pH (Monter-Miranda et al., 2016). Finalmente, el quitosano se seca en un horno a 100°C. El diagrama de bloques de esta sección se ilustra en la figura 2.4.

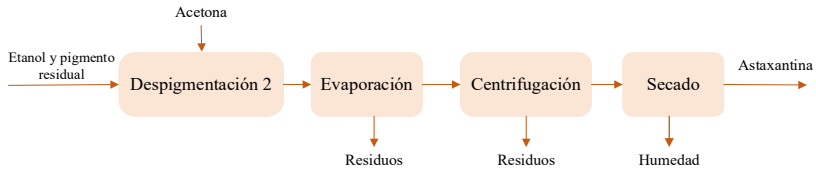
Figura 2.4. Diagrama de bloques de la sección de producción de quitosano



Fuente: elaboración propia.

2.3.4. Sección (iv): Recuperación de astaxantina

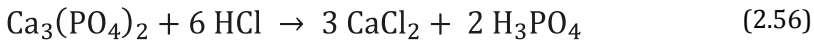
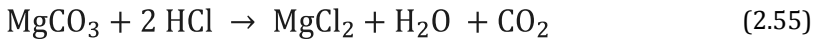
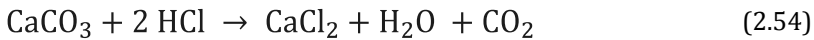
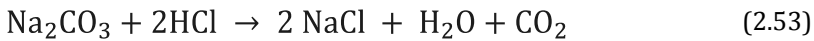
La mezcla de pigmentos y etanol residual provenientes de la primera despigmentación se somete a una segunda despigmentación con acetona 10 %v/v para separar la astaxantina del etanol. Luego, la corriente principal se envía a la unidad de evaporación, la cual se lleva a cabo a temperaturas no mayores a los 45°C para eliminar los disolventes (etanol, acetona). Finalmente, la astaxantina se recupera por centrifugación y se somete a un proceso de secado (Zuorro et al., 2021; Moreno et al., 2021). En la figura 2.5 se presenta el diagrama de bloques para esta sección.

Figura 2.5. Diagrama de bloques sección de recuperación de astaxantina

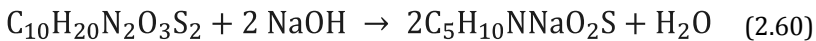
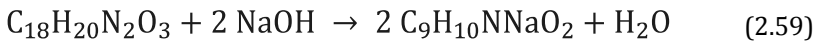
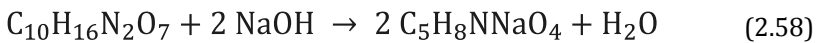
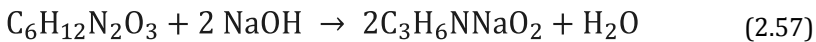
Fuente: elaboración propia.

Las ecuaciones 2.53–2.63 muestran las reacciones químicas para la recuperación de quitina y producción de quitosano.

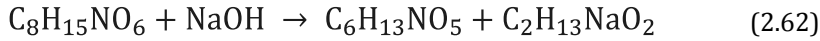
Etapa de desmineralización



Etapa de desmineralización



Etapa de desacetilación



Etapa de neutralización



La composición química del camarón fresco se presenta en la tabla 2.3; el tipo de camarón analizado corresponde al capturado y cultivado en las costas del Caribe colombiano. Dentro de los principales componentes se incluyen agua, ácido L-glutámico, lisina, D-N acetilglucosamina y astaxantina. Este último es el responsable del color anaranjado de los crustáceos, es un tipo de pigmento con propiedades antioxidantes, ampliamente usado para aplicaciones alimentarias y farmacéuticas (Sachindra et al., 2005), por lo que su presencia y recuperación es de interés dentro del proceso.

Tabla 2.3. Composición química de camarón fresco modelada

Componente	Fracción másica
L-Alanina	0,035
Ácido L-glutámico	0,061
L-fenilalanina	0,023
Metionina	0,021
Lisina	0,067
CaCO ₃	0,018
Ca ₃ (PO ₄) ₂	0,044
Na ₂ CO ₃	0,009
MgCO ₃	0,005
D-N-acetilglucosamina	0,068
Metil-palmitato	0,123
Astaxantina	0,001
Agua	0,524

Fuente: elaboración propia.

La composición química para el exoesqueleto de camarón se presenta en la tabla 2.4. Los principales componentes del exoesqueleto de camarón son astaxantina, D-N acetilglucosamina, metil-palmitato y menor cantidad de agua en la misma, lo que favorece los procesos de producción de los co-productos.

Tabla 2.4. *Composición química del exoesqueleto de camarón modelada*

Componente	Fración másica
L-Alanina	0,036
Ácido L-glutámico	0,062
L-fenilalanina	0,023
Metionina	0,021
Lisina	0,068
CaCO ₃	0,029
Ca ₃ (PO ₄) ₂	0,072
Na ₂ CO ₃	0,015
MgCO ₃	0,008
D-N-acetilglucosamina	0,167
Metil-palmitato	0,293
Astaxantina	0,002
Agua	0,204

Fuente: elaboración propia.

La biorrefinación de los residuos de camarón para la obtención de productos de valor agregado ofrece ventajas desde diferentes puntos de vista. El interés de las productoras de camarón es la obtención y comercialización de carne sin aprovechar partes del camarón como la cabeza, la cola y el caparazón. Al aprovechar estos residuos para la obtención de productos como quitina, quitosano y astaxantina, la industria procesadora de camarón puede recibir ganancia de la transformación de residuos en productos y, además, se minimizan los problemas de eliminación de residuos (Zuorro et al., 2021).

2.4. Simulación de la biorrefinería

La simulación de la biorrefinería realizada en Aspen Plus se inicia con la selección de las sustancias almacenadas en la base de datos del programa, seguido de la elección del modelo termodinámico. Toda la información conocida (equipos, flujos másicos, temperatura, presión, reacciones) se ingresa y, por último, se verifica que la simulación esté completa para revisar los resultados arrojados. El software Aspen Plus se caracteriza por tener una base de datos extensa y confiable. Todos los compuestos involucrados en la biorrefinería se encuentran disponibles en la base de datos; por lo tanto, no es necesario agregar o crear moléculas nuevas.

Los supuestos para la simulación de la topología de biorrefinería de camarón para la región Caribe colombiana son los siguientes:

Se emplea el software Aspen Plus para realizar la simulación del proceso.

Se sigue el método del coeficiente de actividad para el cálculo de las propiedades termodinámicas de los componentes puros involucrados en la biorrefinería de camarón.

Se elige el modelo termodinámico Non-Random Two Liquids modificado para electrólitos (ENRTL) Dada la naturaleza polar, no polar y electrolítica de las sustancias involucradas en el proceso.

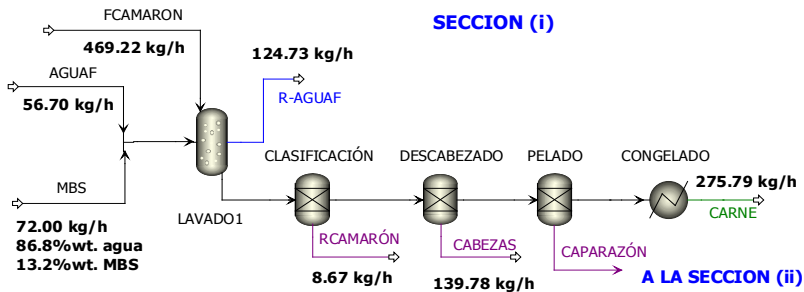
A partir del diagrama de bloques del proceso, las condiciones de operación y los flujos másicos definidos se simula la biorrefinería de camarón.

La metodología adoptada para el desarrollo de la simulación incluye el desarrollo secuencial de convergencia por sección, considerando un estado estacionario y sin factores de pérdidas asociadas a la ubicación.

La simulación de la biorrefinería de camarón se muestra en las figuras 2.6-2.9. La corriente de camarones frescos (FCAMARÓN)

ingresa al lavador de sólidos de una etapa (1) que funciona con una proporción de líquido a sólido de 1:12. En este equipo convergen las corrientes de metabisulfito de sodio (MBS) y de agua helada (AGUAF). Los camarones limpios se envían a tres unidades de separación (CLASIFICACIÓN, DESCABEZADO, PELADO) en las que se separan los crustáceos dañados (RCAMARÓN) de los sanos, seguido de la eliminación de cabezas y caparazones (que representan el 40,3 % del total de los camarones alimentados al proceso). En esta sección, se obtienen 275,79 kg/h de carne de camarón sometida a una temperatura de -18°C . La figura 2.6 muestra el esquema de simulación de la sección de procesamiento de camarones en la topología de la biorrefinería. El balance de masa extendido y las condiciones de operación de las principales corrientes del proceso se resumen en la tabla 2.5.

Figura 2.6. Diagrama de flujo de la simulación de la sección de procesamiento de camarones



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.5. Condiciones de operación y composición másica de las principales corrientes de la sección de procesamiento de camarones

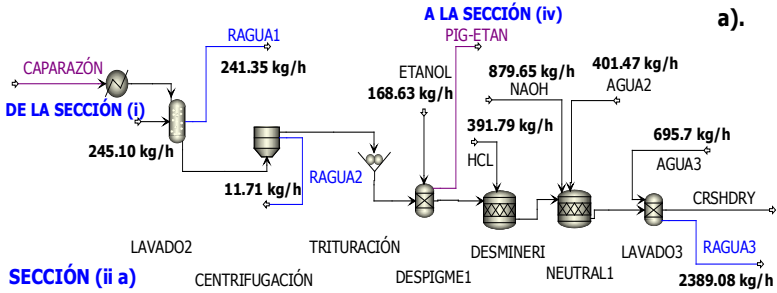
Condiciones de Operación	FCAMARÓN	RCAMARÓN	CABEZAS	CAPARAZÓN	CARNE
Temperatura (°C)	9	9	9	9	-18
Presión (atm)	1	1	1	1	1
Flujo másico (kg/h)	469,22	8,67	139,78	49,02	275,79
	Composición másica				
L-alanina-N-L-Alanil	0,035	0,036	0,036	0,036	0,035
Ácido L-glutámico	0,061	0,062	0,062	0,062	0,061
L-fenilalanina	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
Metionina	0,021	0,021	0,021	0,021	0,020
Lisina	0,067	0,068	0,068	0,068	0,066
CaCO ₃	0,018	0,029	0,029	0,029	0,010
Ca ₃ (PO ₄) ₂	0,044	0,072	0,072	0,072	0,026
Na ₂ CO ₃	0,009	0,015	0,015	0,015	0,005
MgCO ₃	0,005	0,008	0,008	0,008	0,003
D-N-acetilglucosamina	0,068	0,167	0,167	0,167	0,000
Metil-palmitato	0,123	0,293	0,293	0,293	0,006
Astaxantina	0,001	0,002	0,002	0,002	0,000
Agua	0,524	0,204	0,204	0,204	0,745

Fuente: elaboración propia.

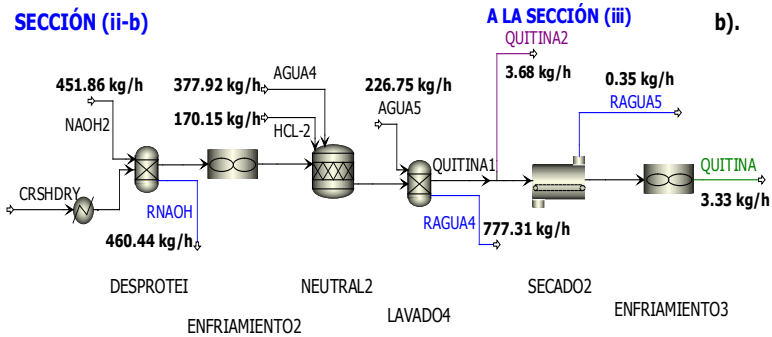
La siguiente sección se modela en dos partes principales: el procesamiento del exoesqueleto de camarón (sección ii-a) y la recuperación de la quitina (sección ii-b). Como se muestra en la figura 2.7-a, la corriente que contiene los exoesqueletos (CAPARAZONES) ingresa al lavador de sólidos (LAVADO2) para eliminar las trazas de impurezas que salen del sistema en la corriente RAGUA. En seguida, el exceso de humedad (RAGUA2) se elimina por centrifugación y la corriente rica en quitina se envía a la molienda (TRITURACIÓN) y despigmentación con etanol (DESPIGME1). En esta etapa, se modela un separador de componentes de acuerdo con las fracciones divididas recogidas en trabajos anteriores a escala de laboratorio (Himmelblau y Bischoff, 1976). Las corrientes que salen del proceso de despigmentación son el exoesqueleto

tratado y la mezcla etanol-pigmento (PIG-ETAN), esta última alimentada en la sección (iv) para la recuperación de astaxantina. El exoesqueleto de camarón despigmentado se somete a la etapa de desmineralización (DESMINERI), seguida de la neutralización entre etapas (NEUTRAL1). En la siguiente etapa de lavado (LAVADO3), la corriente de agua arrastra los restos de ácido clorhídrico e hidróxido de sodio en la salida (RAGUA3). El residuo de los camarones entra en la sección (ii-b) para la recuperación de la quitina, como se muestra en la figura 2.7-b. El exoesqueleto se calienta primero hasta 90°C y se envía a la unidad de desproteínización, en la que sale hidróxido de sodio residual (RNAOH). Se produce una segunda neutralización entre etapas (NEUTRAL2) seguida de un lavado. La corriente residual (RAGUA4) de la etapa de lavado contiene las proteínas y restos de compuestos sin reaccionar. Parte de la quitina recuperada (QUITINA2) se utiliza como precursor del quitosano, mientras que la corriente restante (QUITINA) se seca a 100°C y se enfría en condiciones adecuadas de almacenamiento. Al final de la sección, se obtienen 3,33 kg/h de quitina como producto final y 3,68 kg/h de quitina húmeda que se envían a la sección (iii). El balance de masa extendido y las condiciones de operación de los principales corrientes de esta sección se muestran en las tablas 2.6 y 2.7.

Figura 2.7. Diagrama de flujo de la simulación de: a) procesamiento del exoesqueleto de camarón y b) sección de recuperación de quitina



Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.6. Condiciones de operación y composición másica de las principales corrientes del procesamiento del exoesqueleto de camarón

Condiciones de operación	RAGUA1	RAGUA2	PIG-ETAN	CRSHDRY
Temperatura (°C)	25	25	25	26
Presión (atm)	1	1	1	1
Flujo másico (kg/h)	241,35	11,71	170,69	18,44
Composición másica				
L-Alanina	0,000	0,000	0,000	0,096
Ácido L-Glutámico	0,000	0,000	0,000	0,165
L-fenilalanina	0,000	0,000	0,000	0,062
Metionina	0,000	0,000	0,000	0,056
Lisina	0,000	0,000	0,000	0,180
D-N-acetilglucosamina	0,000	0,000	0,000	0,441
Metil-palmitato	0,000	0,000	0,000	0,000
Astaxantina	0,000	0,000	0,001	0,000
Agua	1,000	1,000	0,150	0,000
Cloruro de Calcio	0,000	0,000	0,000	0,000
Ácido Ortofosfórico	0,000	0,000	0,000	0,000
Etanol	0,000	0,000	0,849	0,000

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.7. Condiciones de operación y composición másica de las principales corrientes de la sección de recuperación de quitina

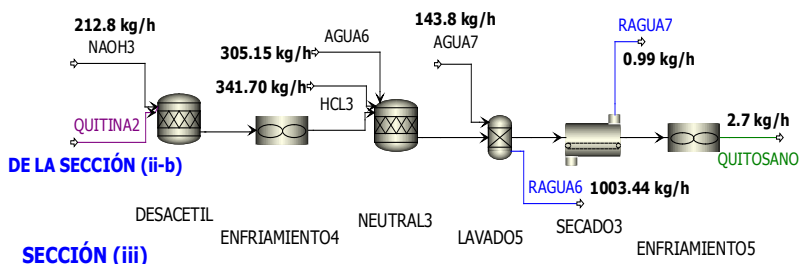
Condiciones de operación	RNAOH	RAGUA4	RAGUA5	QUITINA2	QUITINA
Temperatura (°C)	90	25	100	25	100
Presión (atm)	1	1	1	1	1
Flujo másico (kg/h)	460,44	777,31	0,35	3,68	3,34
Composición másica					
L-Alanina	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000
Ácido L-Glutámico	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000
L-fenilalanina	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
Metionina	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000

Condiciones de operación	RNAOH	RAGUA4	RAGUA5	QUITINA2	QUITINA
Lisina	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000
D-N-acetilglucosamina	0,000	0,002	0,000	0,906	1,000
Agua	0,963	0,990	1,000	0,094	0,000
Cloruro de Hidrógeno	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000
NaOH	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000
NaCl	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000

Fuente: elaboración propia.

La figura 2.8 muestra la simulación de la producción de quitosano dentro de la topología de la biorrefinería. En esta sección se produce la desacetilación de la quitina (DESACETIL) a 110°C, seguida de un enfriamiento y una neutralización entre etapas (NEUTRAL3). Los agentes restantes (NaOH y HCl) salen del sistema en la corriente residual RAGUA6 que se produce durante el lavado (LAVADO5). Tras el secado, la producción total de quitosano se estima en 2,7 kg/h. El balance de masa extendido y las condiciones de operación de los principales corrientes de esta sección se muestran en la tabla 2.8.

Figura 2.8. Diagrama de flujo de simulación de la sección de producción de quitosano



Fuente: elaboración propia.

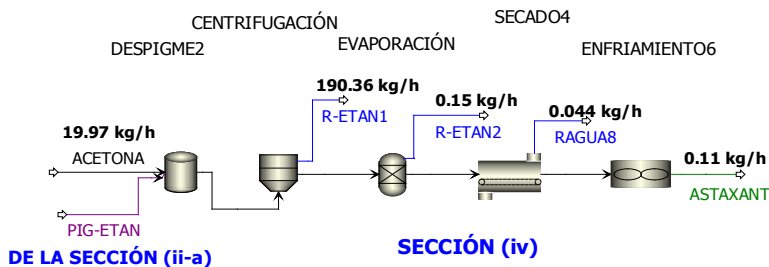
Tabla 2.8. Condiciones de operación y composición másica de las principales corrientes de la sección de producción de quitosano

Condiciones de operación	QUITINA2	RAGUA6	RAGUA7	QUITOSANO
Temperatura (°C)	25	25	100	9
Presión (atm)	1	1	1	1
Flujo másico (kg/h)	3,68	1003,44	0,99	2,70
	Composición másica			
D-N-acetilglucosamina	0,91	0,00	0,00	0,00
Agua	0,09	0,99	1,00	0,00
Cloruro de Hidrógeno	0,00	0,01	0,00	0,00
NaCl	0,00	0,01	0,00	0,00
Quitosano	0,00	0,00	0,00	1,00

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, la simulación del proceso de recuperación de astaxantina de la figura 2.9 utiliza acetona para separar el etanol del pigmento en la corriente PIG-ETAN por principios de solubilidad. Una fracción significativa de la mezcla de etanol y acetona abandona el sistema (R-ETAN1) en la etapa de centrifugación (CENTRIFUGACIÓN), mientras que la fracción restante se separa mediante la evaporación de los compuestos volátiles (R-ETAN2). A continuación, la astaxantina libre de disolventes se seca para eliminar el exceso de humedad (RAGUA8) y se enfría para su almacenamiento. Los productos de la biorrefinería provienen de fuentes naturales, su conservación depende en gran medida de las condiciones de almacenamiento; por lo tanto, se incorporaron etapas de enfriamiento al final de cada sección. La cantidad de astaxantina recuperada fue de 0,11 kg/h de astaxantina. En la tabla 2.9 se muestra el balance de masa extendido y las condiciones de operación de la sección (iv).

Figura 2.9. Diagrama de flujo de simulación de la sección de recuperación de astaxantina



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.9. Condiciones de operación y composición másica de las principales corrientes de la sección de recuperación de astaxantina

Condiciones de operación	R-ETAN1	R-ETAN2	RAGUA8	ASTAXANT
Temperatura (°C)	25	25	100	9
Presión (atm)	1	1	1	1
Flujo másico (kg/h)	190.36	0.15	0.04	0.11
Composición másica				
Astaxantina	0.00	0.00	0.00	1.00
Agua	0.23	0.00	1.00	0.00
Etanol	0.76	0.99	0.00	0.00
Acetona	0.01	0.01	0.00	0.00

Fuente: elaboración propia.

2.4.1. Validación de las propiedades calculadas

La simulación se verifica mediante la comparación de algunas propiedades de los productos obtenidos con datos reportados en la literatura a condiciones estándares de presión y temperatura.

Los resultados se muestran en las tablas 2.10–2.12 para la quitina, quitosano y astaxantina respectivamente.

Tabla 2.10. Comparación de las propiedades de la quitina

Propiedad	Este libro	Reportadas	Fuente	Aproximación
Densidad relativa (g/cm ³)	1,43	1,42	Mushi et al. (2014)	99,70 %
Peso molecular (g/mol)	221,21	161,16	Chemical Book (2017a)	73 %
Punto de ebullición (°C)	445,70	595,40	Chemical Book (2017a)	75 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.11. Comparación de las propiedades del quitosano

Propiedad	Este libro	Reportadas	Fuente	Aproximación
Densidad relativa (g/cm ³)	1,56	1,38	Chemical Book (2017b)	88 %
Peso molecular (g/mol)	179,12	179,09	Chemical Book (2017b)	100 %
Punto de ebullición (°C)	445,70	449,90	Chemical Book (2017b)	99 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.12. Comparación de las propiedades de la astaxantina

Propiedad	Este libro	Reportadas	Fuente	Aproximación
Densidad relativa (g/cm ³)	1,07	1,07	Cayman Chemical Company (2019)	100 %
Peso molecular (g/mol)	596,85	596,83	Cayman Chemical Company (2019)	99,9 %
Punto de ebullición (°C)	773,97	774	Cayman Chemical Company (2019)	99,9 %
Punto de fusión (°C)	219,79	215	Cayman Chemical Company (2019)	97,82 %

Fuente: elaboración propia.

Esto muestra que la aproximación de los resultados obtenidos con los reportados en la literatura es superior al 70 % para todos los productos, lo que indica que las estrategias empleadas para realizar la simulación, los paquetes de datos y los modelos termodinámicos seleccionados son los apropiados.

2.4.2. Capacidad de producción, rendimiento de producción y eficiencia técnica

El desempeño técnico de la biorrefinería de camarón se evalúa a través de métricas de eficiencia técnica y rendimiento de producción. La capacidad de producción es de alrededor 4.534 t/año, teniendo en cuenta el rendimiento promedio de extracción de carne en el procesamiento convencional (entre 45 % y 65 %) y la disponibilidad de la planta (asumida en 91 %). Estas métricas técnicas se calculan de acuerdo con las ecuaciones 2.64–2.66, donde \dot{m}_{FS} y $\dot{m}_{p,i}$ son el flujo másico de camarón fresco y el producto i , respectivamente. $\dot{m}_{p,i,max}$ es el caudal máximo de productos que puede extraerse de una cantidad determinada de camarones suponiendo que los métodos de extracción sean 100 % eficientes.

$$\text{Capacidad de producción (kg/h)} = \dot{m}_{FS} \cdot \text{rendimiento}_{\text{carne,promedio}} \cdot \text{disponibilidad de la planta} \quad (2.64)$$

$$\text{rendimiento de producción (g/kg)} = \frac{\dot{m}_{p,i}}{\dot{m}_{FS}} \quad (2.65)$$

$$\text{Eficiencia técnica (\%)} = \frac{\dot{m}_{p,i}}{\dot{m}_{p,i,max}} \cdot 100 \quad (2.66)$$

La simulación de la topología de la biorrefinería proporciona datos sobre el proceso que dan cuenta del rendimiento técnico. El rendimiento global de la producción se estima en 600,89 g de productos/kg de camarones frescos que ingresan al sistema. La

eficiencia técnica y el rendimiento de la producción por sección de la biorrefinería se resumen en la tabla 2.13. Se esperaba que la carne de la sección (i) alcanzara el mayor rendimiento porque representa el principal producto de la industria del procesamiento del camarón. Se obtienen menores cantidades de quitina, quitosano y astaxantina por kilogramo de camarón fresco, ya que estos productos de alto valor provienen de una pequeña porción de la entrada total, es decir, de los caparazones de camarón. La eficiencia técnica de las secciones (i) y (iv) muestran los valores más altos, revelando recuperaciones superiores al 90 % de las estimaciones teóricas. Para la sección (iii), este indicador de rendimiento es del 40,68 %, lo que sugiere la necesidad de mejorar el proceso para aumentar la recuperación de quitina del exoesqueleto de camarón. Este hallazgo se explica por las pérdidas de quitina en las corrientes de agua residual que salen del sistema durante las etapas de lavado y desproteización.

Tabla 2.13. Indicadores de rendimiento técnico por sección

Sección	i	ii	iii	iv
Producto principal	Carne	Quitina	Quitosano	Astaxantina
Rendimiento de producción (g producto/kg camarón fresco)	287,80	7,10	5,75	0,24
Eficiencia técnica (%)	92,89	40,68	81,08	91,62

Fuente: elaboración propia.

2.4.3. Análisis técnico de unidades de procesamiento

Una descripción detallada de los equipos seleccionados para la simulación de la biorrefinería incluyendo área, altura y diámetro, se presenta en las tablas 2.15-2.18.

Tabla 2.14. Descripción de equipos de la sección de procesamiento de camarones

Etapa	Tipo de equipo	Características
LAVADO1	Filtro de tambor rotatorio	Área: 9,3 m ² Flujo de sólido: 223,3 kg/h Flujo de líquido: 0,37 m ³ /h
CLASIFICACIÓN	Recipiente vertical	Diámetro: 0,91 m Altura: 3,65m Presión de diseño: 1 atm
DESCABEZADO	Recipiente vertical	Diámetro: 0,91 m Altura: 3,65m Presión de diseño: 1 atm
PELADO	Recipiente vertical	Diámetro: 0,91 m Altura: 3,65m Presión de diseño: 1 atm
CONGELACIÓN	Intercambiador de Tubo y coraza	Presión (tubos): 2,39 atm T(tubos): 152,77 °C Diámetro (tubos): 0,025 m T (coraza): 121,11 °C Presión (coraza): 1 atm Longitud de tubos: 6m Número de pasos por tubo: 1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.15. Descripción de equipos de la sección de recuperación de quitina

Etapa	Tipo de equipo	Características
LAVADO2	Filtro de tambor rotatorio	Área: 9,3 m ² Flujo de sólido: 39,02 kg/h Flujo de líquido: 0,25 m ³ /h
CENTRIFUGACIÓN	Centrifuga automática de lotes	Diámetro: 0,61 m
TRITURACIÓN	Molino giratorio	Potencia: 20kW Tamaño del producto: 0,00051m
DESPIGME1	Recipiente vertical	Diámetro: 0,91 m Altura: 3,65m Presión de diseño: 1 atm

Etapa	Tipo de equipo	Características
DESMINERI	Reactor de agitación	Volumen líquido: 0,14 m ³ Diámetro: 0,30 m ² Altura: 1,98 m Presión de diseño: 1 atm
NEUTRAL1	Reactor de agitación	Volumen líquido: 0,4 m ³ Diámetro: 0,46 m ² altura: 2,44 m Presión de diseño: 1 atm
LAVADO3	Recipiente vertical	Diámetro: 0,91 m Altura: 3,65 m Presión de diseño: 1 atm
CALENTAMIENTO2	Intercambiador de Tubo y coraza	Presión (tubos): 2,39 atm T (tubos): 152,77 °C Diámetro de tubos: 0,025 m T (coraza): 121,11 °C Presión (coraza): 1,26 atm Longitud de tubos: 6m Número de pasos por tubo: 1
DESPROTEI	Reactor de agitación	Volumen líquido: 0,15 m ³ Diámetro: 0,30 m ² Altura: 2,13 m Presión de diseño: 1 atm
NEUTRAL2	Reactor de agitación	Volumen líquido: 0,15 m ³ Diámetro: 0,30 m ² Altura: 2,13 m Presión de diseño: 1 atm
LAVADO4	Recipiente vertical	Diámetro: 0,91 m Altura: 3,65 m Presión de diseño: 1 atm
SECADO2	Secador de bandejas	Área bandejas: 3,72 m ²

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.16. Descripción de equipos de la sección de producción de quitosano

Etapa	Tipo de equipo	Características
DESACETIL	Reactor de agitación	Volumen líquido: 0,13 m ³ Diámetro: 0,30 m Altura: 1,83 m Presión de diseño: 1 atm
ENFRIAMIENTO4	Intercambiador de Tubo y coraza	Presión (tubos): 4,10 atm T (tubos): 137,77 °C Diámetro (tubos): 0,025 m T (coraza): 137,7 °C Presión (coraza): 2,40 atm Longitud de tubos: 6m Número de pasos por tubo: 1
NEUTRAL3	Reactor de agitación	Volumen líquido: 0,37 m ³ Diámetro: 0,46 m Altura: 2,28 m Presión de diseño: 1 atm
LAVADO5	Recipiente vertical	Diámetro: 0,91 m Altura: 3, 65 m Presión de diseño: 1 atm
SECADO3	Secador de bandejas	Área bandejas: 3,72 m ²

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.17. Descripción de equipos de la sección de recuperación de astaxantina

Etapa	Tipo de equipo	Características
DESPIGME2	Recipiente vertical	Diámetro: 0,91 m Altura: 3, 65 m Presión de diseño: 1 atm
CENTRIFUGACIÓN	Centrifuga automática de lotes	Diámetro: 0,61 m
SECADO4	Secador de bandejas	Área bandeja: 3,72 m ²

Fuente: elaboración propia.

2.5. Conclusiones

Por primera vez se presenta la simulación de una topología de aprovechamiento integral de camarón bajo el concepto de biorrefinería, aplicado a la región Caribe colombiana. Los resultados permiten verificar la simulación a través de la comparación de propiedades fisicoquímicas de los productos, para los que no se encuentra mayor diferencia. La eficiencia técnica más alta de la biorrefinería (92,89 %) y el mayor rendimiento de producción (587,8 g de producto/kg de camarón fresco) se alcanza en la sección de procesamiento de camarones, donde se obtiene carne como producto final. La sección de recuperación de astaxantina registra la segunda mayor eficiencia técnica, con un 91,62 %, seguida de la producción de quitosano a partir de quitina. De 469,22 kg/h de camarón fresco en adelante, es posible obtener 275,79 kg/h de carne, 3,33 kg/h de quitina, 2,7 kg/h de quitosano y 0,11 kg/h de astaxantina.

Referencias

- Abadir, E., Salam, N. & Barakat, F. (2019). Study on Production and Kinetics of Chitosan from Shrimp Shell Waste using Factorial Design Experimental Technique. *Journal of Advanced Chemical Sciences*, 5(1), 615–617. <https://doi.org/10.30799/jacs.204.19050103>.
- Anderson T. & Prausnitz, J. (1978). *Application of the UNIQUAC Equation to Calculation of Multicomponent Phase Equilibria. 1. Vapor-Liquid Equilibria*. Department of Chemical Engineering, University of California.
- Arora, A., Banerjee, J., Vijayaraghavan, R., MacFarlane, D. & Patti, A. (2018). Process design and techno-economic analysis of an integrated mango processing waste biorefinery. *Industrial Crops and Products*, 116, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.061>.

- Bautista, W. (2020). *Metodología para la implementación de modelos predictivos para la estimación de propiedades termodinámicas y de transporte en la simulación de procesos oleoquímicos*. Universidad Nacional de Colombia.
- Bonfante-Álvarez, H., De Avila-Montiel, G., Herrera-Barros, A., Torrenegra-Alarcón, M. & González-Delgado, Á. (2018). Evaluation of five chitosan production routes with astaxanthin recovery from shrimp exoskeletons. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 1969–1974. <https://doi.org/10.3303/CET1870329>.
- Bradić, B., Novak, U. & Likozar, B. (2020). Crustacean shell bio-refining to chitin by natural. *Green Process Synth.* 9(1), 13–25. <https://doi.org/10.1515/gps-2020-0002>.
- Carlson, E. (1996). Don' t Gamble with Physical Properties. *Chemical Engineering Progress*, 35–46.
- Chemical Book. (2017a). *Chitina*. https://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB9853096_EN.htm.
- Chemical Book. (2017b) *Quitosano*. https://www.chemicalbook.com/chemicalproductproperty_en_cb1479274.htm.
- Cogollo-Herrera, K., Bonfante-Álvarez, H., De Ávila-Montiel, G., Barros, A. & González-Delgado, Á. (2018). Techno-economic sensitivity analysis of large scale chitosan production process from shrimp shell wastes. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 2179–2184. <https://doi.org/10.3303/CET1870364>.
- Diminan, A. (2003). Chapter 6 Phase equilibria. *Computer Aided Chemical Engineering*, 13, 181-226.
- Durán-García, M., y Ruiz-Navas, R. (2020). Simulador de propiedades termodinámicas en la conversión de la biomasa forestal de aserrín de pino. *Maderas, Ciencia y tecnología*, 22(3), 347-364. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000309>.
- Evans, L., Boston, J., Britt, H., Gallier, P., Gupta, P., Joseph, B., Mahalec, V., Seider, W., Ng, E. & Yagi, H. (1979). ASPEN: An Advanced System

- for Process Engineering, *Computers & Chemical Engineering*, 3(1-4), 319–327. [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(79\)80053-8](https://doi.org/10.1016/0098-1354(79)80053-8).
- Fredenslund, A., Jones, R. & Prausnitz, J. (1975). *Group-Contribution Estimation of Activity Coefficients in Non ideal Liquid Mixtures*. Department of Chemical Engineering University of California Berkeley.
- Gómez, J., Nobre, C., Teixeira, J. & Sánchez, O. (2022). Towards a biorefinery processing waste from plantain agro-industry: Assessment of the production of dairy cattle feed through process simulation. *Biosystems Engineering*, 217, 131-149. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.03.008>.
- González, J. (2019). Producción local de camarón completó cuatro años al alza. *Agronegocios*. <https://goo.su/PEjdd>
- Himmelblau, D. y Bischoff, K. (1976). *Análisis y simulación de procesos*. Editorial Reverte.
- Hu, J., Wang, R. & Mao, V. (2008). Some useful expressions for deriving component fugacity coefficients from mixture fugacity coefficient. *Fluid Phase Equilibria*, 268, 7-13.
- Kancherla, R., Shaik, N., Kalyani, S. & Sundergopal, S. (2021). Modeling and simulation for design and analysis of membrane-based separation processes. *Computers & Chemical Engineering*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107258>.
- Kotoupas, A., Rigas, F. & Chalaris, M. (2007). Computer-aided process design, economic evaluation and environmental impact assessment for treatment of cheese whey wastewater. *Desalination*. 213, 238–252. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.611>.
- Koulouris, A., Misailidis, N. & Petrides, D. (2021). Applications of process and digital twin models for production simulation and scheduling in the manufacturing of food ingredients and products, *Food and Bioproducts Processing*, 126, 317–333. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.01.016>.

- Larbi, F., García, A., del Valle, L., Hamou, A., Puiggalí, J., Belgacem, N. & Bras, J. (2018). Simulation basis for a techno-economic evaluation of chitin nanomaterials production process using Aspen Plus® software. *Data in Brief*, 20, 1556–1560. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.08.130>.
- Liu, F., Guo, X., Wang, Y., Chen, G. & Hou, L. (2021). Process simulation and economic and environmental evaluation of a corncob-based biorefinery system. *Journal of Cleaner Production*, 329. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129707>.
- Meramo-Hurtado, S. & González-Delgado, A. (2019). Biorefinery synthesis and design using sustainability parameters and hier-archical/3D multi-objective optimization. *Journal of Cleaner Production*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118134>.
- Misailidis, N., Campbell, G., Du, C., Sadhukhan, J., Mustafa, M., Mateos-Salvador, F. & Weightman, R. (2009). Evaluating the feasibility of commercial arabinoxylan production in the con-text of a wheat biorefinery principally producing ethanol. Part 2. Process simulation and economic analysis. *Chemical Engineering Research and Design*. 87, 1239–1250. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.12.028>.
- Monter-Miranda, J., Tirado-Gallegos, J., Zamudio-Flores, P., Ríos-Velasco, C., Ornelas-Paz, J., Salgado-Delgado, R., Espinosa-Solis, V. y Hernández-Centeno, F. (2016). Extracción y Caracterización de Propiedades Físicoquímicas, Morfológicas y Estructurales de Quitina y Quitosano de *Brachystola magna* (Girard). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(3), 749-761.
- Moreno, K., Martínez, J. & González, A. (2021). Development of a biorefinery approach for shrimp processing in North-Colombia: Process simulation and sustainability assessment. *Environmental Technology & Innovation*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101461>.
- Moreno-Sader, K., Meramo-Hurtado, S. & González-Delgado, Á. (2020). Environmental sustainability analysis of chitosan microbeads

- production for pharmaceutical applications via computer-aided simulation, WAR and TRACI assessments. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100212>.
- Mushi, N., Utsel, S. & Berglund, L. (2014). Nanostructured biocomposite films of high toughness based on native chitin nanofibers and chitosan. *Frontiers in Chemistry*, 2. <https://doi.org/10.3389/fchem.2014.00099>.
- Nguyen, T. (2009). *Chemical Engineering Thermodynamics II*. Chemical and Materials Engineering, Cal Poly Pomona.
- Nirmal, N. & Benjakul, S. (2011). Retardation of quality changes of Pacific white shrimp by green tea extract treatment and modified atmosphere packaging during refrigerated storage. *International Journal of Food Microbiology*, 149(3), 47–253. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.07.002>.
- Cayman Chemical Company. (2019). *Astaxantina safety data sheet*. <https://cdn.caymanchem.com/cdn/msds/70685m.pdf>.
- Oreggioni, G., Luberti, M., Reilly, M., Kirby, M., Toop, T., Theodorou, M. & Tassou, S. (2017). Techno-economic analysis of bio-methane production from agriculture and food industry waste. *Energy Procedia*, 123, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.252>.
- Redlich O. & Kwong, J. (1948). *On the Thermodynamics of Solutions. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions*. Shell Development Company, Emeryville.
- Renon H. & Prausnitz, J. (1968). *Local Compositions in Thermodynamic Excess Functions for Liquid Mixtures*. University of California, Berkeley, California.
- Routray, W., Dave, D., Cheema, S., Vegneshwaran, V. & Pohling, J. (2019). Biorefinery approach and environment-friendly extraction for sustainable production of astaxanthin from marine wastes. *Critical Reviews in Biotechnology*, 39, 469–488. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1573798>.

- Sachindra, N., Bhaskar, N. & Mahendrakar, N. (2005). Carotenoids in different body components of Indian shrimps. *Journal of science of food and agriculture*, 85(1), 167–172. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1977>.
- Sieber, V., Hofer, M., Brück, W., Garbe, D., Brück, T. & Lynch, C. (2018). ChiBio: An Integrated Bio-refinery for Processing Chitin-Rich Bio-waste to Specialty Chemicals. In P. Rampelotto & A. Trincone. (Ed.), *Grand Challenges in Marine Biotechnology* (pp. 555–578). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69075-9_14.
- Smith, J., Van Ness, H. y Abbott, M. (1995). *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. McGraw Hill.
- Srinivasan, H., Kanayairam, V. & Ravichandran, R. (2018). Chitin and chitosan preparation from shrimp shells *Penaeus monodon* and its human ovarian cancer cell line, PA-1. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 662–667. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.09.035>.
- Turban, M. (2020). *Thermodynamic and Thermophysical Properties of Humid Air by Using Cubic Peng-Robinson Eos*. School of Engineering, Department of Mechanical Engineering; Ege University, Bornova.
- Wilson, G. (1963). Vapor-liquid equilibrium. XI. A New Expression for the Excess Free Energy of Mixing. *Journal of the American Chemical Society (American Chemical Society)*, 86(2), 127-130.
- Wilson, G. (1966). Calculation of enthalpy data from a modified redlich-kwong equation of state. In K. Timmerhaus. (Ed.), *Advances in Cryogenic Engineering. Advances in Cryogenic Engineering*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0522-5_43.
- Zuorro, A., Moreno, K. & González, A. (2021). Evaluating the feasibility of a pilot-scale shrimp biorefinery via techno-economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128740>.



Capítulo III.

Evaluación económica y análisis de sensibilidad técnico-económica de una biorrefinería de camarón

El aspecto económico es uno de los componentes más importantes en el diseño de procesos; muchas de las decisiones técnicas y ambientales están fuertemente influenciadas por el factor económico. Por lo tanto, para los ingenieros resulta importante el estudio económico de los procesos, lo que hace posible la evaluación de la viabilidad de nuevos proyectos, la implementación de mejoras en el rendimiento de procesos existentes, la toma de decisiones de diseño y de operación, la comparación de alternativas tecnológicas, la orientación estratégica de la empresa, y el establecimiento de políticas acorde a los objetivos del proceso y producto.

3.1. Tipos de costos y estimación

Dos tipos de costos primarios deben ser evaluados a la hora de realizar una evaluación económica: la inversión total de capital (TCI) y los costos de operación (OC) (El-Halwagi, 2011).

3.1.1. Inversión total de capital (TCI)

La inversión total de capital es el dinero necesario para la compra e instalación de la planta y equipos auxiliares, para prever los gastos necesarios para el inicio de la operación del proceso (Peters et al., 2003); se define como se muestra en la ecuación 3.1.

$$TCI = FCI + WCI + SUC \quad (3.1)$$

Donde FCI es la inversión de capital fijo, WCI es la inversión de capital trabajo y SUC son los costos de arranque.

Inversión de capital fijo (FCI): dinero necesario para adquirir los equipos de procesamiento, unidades auxiliares, tuberías, instalaciones eléctricas, compra y preparación del terreno, estructuras civiles, costos legales y sistemas de control. Los FCI se clasifican en dos grupos: en inversión de capital fijo directa (DFCI) y en inversión de capital fijo indirecta (IFCI).

La inversión de capital fijo directa (DFCI): incluye los costos fijos asociados directamente con la producción, los cuales se describen a continuación:

- Equipos comprados (FOB): incluye los equipos de procesamiento, manipulación y almacenamiento de materias primas y productos finales.
- Instalación de equipos comprados: incluye la mano de obra para la instalación de los equipos, cimientos, soportes, plataformas, aislamientos, gastos de construcción y otros factores directamente relacionados con el ensamble y montaje del equipo comprado.
- Instrumentación y control: incluye los elementos necesarios para monitorear y controlar las variables del proceso, estos costos dependen del grado de control requerido.

- Tubería: incluye la mano de obra, las válvulas, accesorios, tubos, soportes, aislamiento y otros elementos que intervienen en la construcción completa de todo el sistema de tubería utilizado directamente en el proceso (transporte de materia prima, productos intermedios, productos terminados, vapor, agua, aire, tubería de alcantarillado, entre otros).
- Instalaciones eléctricas: incluye los costos de instalación, mano de obra y materiales para el suministro de energía eléctrica e iluminación, incluyendo cableado para equipos de potencia, transformación y servicio, cableado para instrumentos de control, entre otros.
- Edificios (incluidos los servicios): son los costos de mano de obra, materiales y suministros involucrados en el levantamiento de todos los edificios relacionados con la planta, incluyen los costos de fontanería, calefacción, iluminación, ventilación y servicios similares.
- Instalaciones de servicios: son los costos de las utilidades para suministrar vapor, agua, electricidad, aire comprimido, y combustible para la planta industrial. También incluye los servicios de eliminación de residuos, protección contra incendios, y diferentes artículos de servicio, como tiendas, primeros auxilios y equipos de cafetería (Peters et al., 2003).

La inversión de capital fijo indirecta (IFCI): son los costos fijos que no están directamente ligados a la producción, los cuales se describen a continuación.

- Terrenos: por lo general estos costos no disminuyen con el tiempo, por lo tanto, no deben incluirse en la inversión

en capital fijo cuando se estimen ciertos costos anuales de operación, como la depreciación.

- Mejoras de patio: incluye explanación, cercado, carreteras, aceras, paisajismo, y costos similares.
- Ingeniería y supervisión: incluye el diseño e ingeniería de la construcción, elaboración, compras, contabilidad, ingeniería de costos, viajes y estadía, divulgación y comunicaciones, gastos de oficina y gastos generales.
- Equipos para investigación y desarrollo: incluye los costos relacionados a la compra de los equipos que se utilizan para labores de investigación y desarrollo, diferentes a los utilizados para el análisis de materia prima, producto final o control de calidad.
- Gastos de construcción: incluyen la construcción y operación temporal, compra y alquiler de maquinaria de construcción, personal de oficina ubicado en el sitio de construcción, nómina de construcción, viajes y estadía, impuestos, seguros y otros gastos generales de construcción.
- Gastos legales: todos los gastos relacionados con la legalización de la construcción, operación y venta de la planta.
- Honorarios del contratista: los honorarios del contratista se estiman en alrededor el 2-8 % del costo fijo de planta directa o 1,5-6 % del TCI.
- Contingencias: el factor de contingencia se incluye para compensar eventos impredecibles, como tormentas, inundaciones, huelgas, cambios de precio, pequeños cambios en el diseño, errores en la estimación, y otros gastos imprevistos, que han mostrado ser de naturaleza recurrente (Peters et al., 2003).

Inversión de capital trabajo (WCI): es el dinero necesario para pagar por los gastos de operación, justo hasta el momento en que se vende la primera unidad de producto, así como los gastos obligados a pagar por el almacenamiento de las materias primas antes de la producción. Estos costos son recuperados al final del proyecto (El-Halwagi, 2012).

Los costos de arranque (SUC): es el dinero necesario para pagar por los costos no recurrentes asociados con la creación de una empresa, como honorarios del contador, gastos legales, gastos de registro, publicidad, actividades de promoción y capacitación inicial de los empleados, se pueden calcular como un 10 % de los FCI (Peters et al., 2003; El-Halwagi, 2012).

La tabla 3.1 resume los costos incluidos dentro del cálculo de la inversión total de capital. Además, se presentan las correlaciones aproximadas para estimar cada rubro siempre que se trate de un proceso nuevo y no probado, como es el caso de las biorrefinerías. La estimación de los costos asociados a la compra de los equipos se considera la base de varios métodos de prediseño para el cálculo de los TCI.

Tabla 3.1. *Estimación de los rubros de inversión total de capital*

Rubro	Correlación (aproximada)
Equipos comprados y entregados	1.1 veces valor FOB
Instalación de equipos comprados	10-20 % Equipos comprados y entregados
Instrumentación y control	5-8 % Equipos comprados y entregados
Tubería	12-20 % Equipos comprados y entregados
Instalaciones eléctricas	7-13 % Equipos comprados y entregados
Edificios (incluidos los servicios)	30-50 % Equipos comprados y entregados
Instalaciones de servicios	20-30 % Equipos comprados y entregados

Rubro	Correlación (aproximada)
DHCI	Suma de rubros anteriores
Terrenos	3-6 % Equipos comprados y entregados
Mejoras de patio	20-40 % Equipos comprados y entregados
Ingeniería y supervisión	25-32 % Equipos comprados y entregados
Equipos (I+D)	3-10 % Equipos comprados y entregados
Gastos de construcción	20-34 % Equipos comprados y entregados
Gastos legales	0-1 % Equipos comprados y entregados
Honorarios del contratista	2-7 % Equipos comprados y entregados
Contingencias	20 % Equipos comprados y entregados
IFCI	Suma de rubros anteriores
FCI	DHCI + IFCI
WCI	30-50 % FCI
SUC	5-10 % FCI
Inversión total de capital (TCI)	FCI + WCI + SUC

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Costos de Operación (OC)

Los costos de operación hacen referencia al dinero necesario para mantener en funcionamiento la planta una vez se inicien las labores de producción. Se calculan a partir de la suma de los costos de producción directos (DPC), cargos fijos (FCH), *Overhead* (POH) y gastos generales (GE) (El-Halwagi, 2012), como se indica en la ecuación 3.2.

$$OC = DPC + FCH + POH + GE \quad (3.2)$$

Costos de producción directos (DPC): corresponden a los gastos asociados directamente con la operación de la planta. Dependen de la capacidad de producción o de la cantidad de materia prima

que se esté procesando en determinado momento, e incluyen los siguientes rubros:

- **Materias primas:** la cantidad de las materias primas se determina a partir del balance de materia del proceso. Los precios unitarios se obtienen mediante consultas directas a los proveedores. En el caso de las sustancias químicas, los precios unitarios se pueden encontrar consultando en revistas especializadas. Estos costos incluyen los gastos de transporte y carga.
- **Mano de obra operativa:** depende de varios factores incluyendo el número y las habilidades de los empleados, el número de turnos por día, el grado de automatización de procesos, los salarios vigentes para los diferentes tipos de empleados y la región objetivo. En términos generales se puede clasificar en mano de obra especializada y no especializada.
- **Supervisión directa y trabajo de oficina:** La cantidad necesaria de este tipo de trabajo está estrechamente relacionada con la cantidad total de trabajo operativo, la complejidad de la operación y los estándares de calidad de los productos.
- **Servicios industriales (U):** se utilizan para llevar a cabo reacciones o durante las etapas de separación, para proporcionar la calefacción y refrigeración necesarias, y transportar materiales. Estos servicios incluyen combustibles, vapor, agua, refrigerantes, aire, entre otros. El balance de energía permite cuantificar los requerimientos de los servicios industriales. Los costos unitarios de energía pueden ser consultados en páginas web.
- **Mantenimiento y reparaciones:** incluyen la mano de obra, la supervisión y los materiales. Ellos varían en función del proceso, cronogramas y condiciones de la planta.

- **Suministros operativos:** incluyen insumos como lubricantes, productos químicos de ensayo, y materiales similares.
- **Cargos de laboratorio:** incluyen el costo de las pruebas de laboratorio para el control de las operaciones y de control de calidad de los productos.
- **Patentes y regalías:** una cierta cantidad del gasto total involucrado en el desarrollo y adquisición de los derechos de patente deben estar cargados a la planta como un gasto de operación. Estos costos se amortizan generalmente sobre el tiempo de protección legal de la patente.

Cargos Fijos (FCH): son los gastos independientes a la operación de la planta y no se ven afectados por la capacidad de producción. Se clasifican en depreciación, impuestos locales, seguros e interés o renta.

- **Depreciación (D):** consiste en la disminución del valor de un equipo o una pieza de maquinaria de acuerdo con su vida útil. Cuando los gastos de depreciación están protegidos de impuestos sobre la renta de la empresa, el dinero ahorrado se puede utilizar para la sustitución de los activos de los procesos o para la recuperación de capital del valor inicial del activo.
- **Impuestos locales:** la magnitud de los impuestos locales depende de la localización de la planta y las leyes regionales.
- **Seguros:** las tasas de seguros dependen del tipo de proceso que se lleva a cabo y del grado de protección disponible. Sobre una base anual, estas tasas ascienden a aproximadamente 1 % de la Inversión de Capital Fijo.
- **Intereses o renta:** dependiendo si los terrenos o edificios son propios o rentados, y si hubo un endeudamiento para

adquirirlos, se debe incluir el costo de arrendamiento o el pago de intereses sobre los préstamos.

Overhead (POH): gastos asociados con servicios hospitalarios y médicos, ingeniería general, servicios de seguridad, recreación, mantenimiento general de la planta, sobrecarga de nómina, laboratorios de control, embalaje, protección de la planta, conserje, agencia de empleo, distribución de utilidades, tiendas, comunicaciones, transporte dentro de la planta, depósitos y envíos y recepción.

Gastos generales (GE): corresponden al dinero necesario para cubrir gastos administrativos, costos de distribución y mercadeo, e investigación y desarrollo (Peters et al., 2003; El-Halwagi, 2012).

- Gastos administrativos: incluyen los sueldos de los administradores, secretarías, contadores, y trabajadores similares. Además de los costos de suministros y equipos de oficina, comunicaciones externas, edificios administrativos y otros elementos relacionados con gastos de actividades administrativas.
- Costos de distribución y mercadeo: incluyen sueldos, suministros y otros gastos para las oficinas de venta; salarios, comisiones y gastos de viaje para los vendedores, gastos de envío, costos de los contenedores, gastos de publicidad y servicio técnico de ventas.
- Investigación y desarrollo: incluyen los sueldos para todo el personal directamente relacionadas con estos trabajos, los gastos fijos y de funcionamiento de toda la maquinaria y equipos involucrados, los costos de materiales y suministros (Peters et al., 2003; El-Halwagi, 2012).

La tabla 3.2 resume los costos incluidos dentro del cálculo de los costos totales de operación. Se muestran las correlaciones aproximadas empleadas para estimar cada rubro. El costo de las materias primas, servicios industriales y mano de obra operativa se deben estimar inicialmente.

Tabla 3.2. *Estimación de los rubros de costos totales de operación*

Rubro	Correlación (aproximada)
Materias primas	Calcular
Servicios industriales	Calcular
Mantenimiento y reparaciones (MR)	2-5 % FCI
Suministros operativos	12-25 % MR
Mano de obra operativa (OL)	Calcular
Supervisión directa y trabajo de oficina	10-15 % OL
Cargos de laboratorio	5-10 % OL
Patentes y regalías	0-1 % FCI
DPC	Suma de rubros anteriores
Depreciación (D)	5-10 % FCI
Impuestos locales	3-10 % FCI
Seguros	0.5-1 % FCI
Intereses/renta	0.5-1 % FCI
Cargos fijos (FCH)	Suma de rubros anteriores
Overhead (POH)	50-60 % OL
Gastos generales (GE)	20-25 % (DPC+FCH + POH)
Costos totales de operación (OC)	DPC+FCH+POH+GE

Fuente: elaboración propia.

Los costos fijos y operativos se pueden anualizar para efectos comparativos de diferentes escenarios y para tener en cuenta la

depreciación. En el caso del FCI, la expresión anualizada se muestra en la ecuación 3.3.

$$AFC = \frac{FCI_0 - FCI_s}{N} \quad (3.3)$$

Donde FCI_0 es el valor inicial del FCI depreciable, y FCI_s es el valor de salvamento de los FCI, que corresponde al valor de los FCI al final del período de recuperación (N años).

Los costos operativos se pueden expresar por unidad de materia prima, de producto o por unidad de tiempo. Para el caso de las biorrefinerías, al buscar obtenerse varios productos a partir de una materia prima, se recomienda expresar los costos operativos en términos de la materia prima y no de los productos. Los OC dados en unidad monetaria por año, se denominan costos operativos anualizados (AOC). Los costos totales anualizados del proceso (TAC) (Peters et al., 2003; El-Halwagi, 2012) se pueden calcular como se muestra en la ecuación 3.4.

$$TAC = AFC + AOC \quad (3.4)$$

Los costos operativos expresados por unidad de producto o de materia prima se denominan costos totales operativos normalizados (NOC), y se pueden calcular como se muestra en la ecuación 3.5, donde m_{RM} es el flujo de materia prima en t/año. Para obtener la normalización de los costos operativos variables (NVOC) (Romero et al., 2017) se sigue la ecuación 3.6.

$$NOC = \frac{AOC}{m_{RM}} \quad (3.5)$$

$$NVOC = \frac{AOC - FCH}{m_{RM}} \quad (3.6)$$

3.2. Análisis del punto de equilibrio

El análisis del punto de equilibrio permite determinar las condiciones a las cuales los costos de producción igualan a los ingresos generados por la venta de los productos. Para el cálculo de las capacidades de producción de equilibrio en un proceso en el cual se obtiene más de un producto a partir de la misma materia prima, es conveniente tomar como base de cálculo la materia prima y no los diferentes productos obtenidos (González-Delgado et al., 2015). Por lo anterior, se define una relación entre la cantidad de producto i obtenido por unidad de materia prima. Para ello se define el término θ_i , y la capacidad de producción de equilibrio ($m_{\text{RM-BEP}}$) (Romero et al., 2017) como indican las ecuaciones 3.7 y 3.8.

$$m_{\text{RM-BEP}} = \frac{\text{AFC} + \text{FCH}}{\left(\sum_i \frac{C_i^v}{\theta_i}\right) - \text{NVOC}} \quad (3.7)$$

$$\theta_i = \frac{m_{\text{RM}}}{m_i} \quad (3.8)$$

3.3. Eficiencia On-Stream en el punto de equilibrio

Un parámetro importante en el estudio económico de un proceso químico es la eficiencia *On-Stream* en el punto de equilibrio, la cual constituye una variable de respuesta para los análisis de sensibilidad del proceso relacionados con costos de materias primas y productos finales. Esta eficiencia se define en términos de tiempo o de capacidad de producción, tanto en el equilibrio como a una producción menor a la máxima, y viene dada por la ecuación 3.9 para el punto de equilibrio, donde m_{BEP} es la capacidad de producción de

equilibrio y m_{\max} corresponde a la capacidad de producción máxima o de diseño de la planta (Romero et al., 2017).

$$\eta_{\text{On-stream}}^{\text{BEP}} = \frac{m_{\text{BEP}}}{m_{\max}} \quad (3.9)$$

3.4. Indicadores de rentabilidad

3.4.1. Ganancia bruta (GP)

Indica las utilidades del proceso sin descontar los impuestos; se puede calcular sin o con la inclusión de la depreciación de los activos (DGP), para este último caso, la expresión se muestra en la ecuación 3.10.

$$\text{DGP} = \sum_i m_i C_i^v - \text{TAC} \quad (3.10)$$

3.4.2. Rentabilidad después de impuestos (PAT)

Indica la ganancia real neta de un proceso, se calcula por la ecuación 3.11 donde itr es la tasa impositiva fijada por el gobierno para los ingresos derivados del proceso (El-Halwagi, 2012; Romero et al., 2017).

$$\text{PAT} = \text{DGP}(1 - \text{itr}) \quad (3.11)$$

3.4.3. Potenciales económicos (EP)

Se calculan por medio de las ecuaciones 3.12–3.14.

$$EP_1 = \sum_i m_i C_i^V - \sum_j m_j C_j^{RM} \quad (3.12)$$

$$EP_2 = \sum_i m_i C_i^V - \sum_j m_j C_j^{RM} - U \quad (3.13)$$

$$EP_3 = \sum_i m_i C_i^V - AOC \quad (3.14)$$

3.4.4. Flujo de caja acumulado (CCF)

Se define como la relación entre las utilidades del proceso con respecto a la inversión de capital, como indica la ecuación 3.15. Un proceso es atractivo desde un punto de vista económico al alcanzar un CCF menor a 1 /año (El-Halwagi, 2012; Romero et al., 2017).

$$CCF = \frac{\sum m_i C_i^V - AOC}{TCI} \quad (3.15)$$

3.4.5. Período de Recuperación de la Inversión sin incluir depreciación (PBP)

Indica el tiempo en que se recupera la inversión de capital fijo en su totalidad. Entre menor sea este tiempo, más atractivo será el proyecto (El-Halwagi, 2012; Romero et al., 2017). El PBP se calcula como se muestra en la ecuación 3.16.

$$PBP = \frac{FCI}{PAT} \quad (3.16)$$

3.4.6. Período de recuperación de la inversión incluyendo la depreciación (DPBP)

Indica el tiempo en que se recupera toda la inversión de capital fijo incluyendo la depreciación. Este indicador se determina calculando inicialmente los gastos descontables no pertenecientes al FCI (DnFCI) por medio la ecuación 3.17. El DPBP se localiza identificando el momento en el que el flujo de caja descontable acumulativo del proyecto es igual a este valor (El-Halwagi, 2012).

$$\text{DnFCI} = -(\text{Terreno} + \frac{\text{WCI}}{(1 - \text{tasa de descuento } (\%))^2}) \quad (3.17)$$

3.4.7. Retorno de la inversión (ROI)

El retorno de la inversión permite determinar la capacidad de beneficio de un proyecto sin incluir el valor temporal del dinero. Se calcula como se muestra en la ecuación 3.18, a partir de la relación de la utilidad después de impuestos (PAT) con la inversión total de capital. EL ROI tiene las unidades de porcentaje por año.

$$\text{ROI} = \frac{\text{PAT}}{\text{TCI}} * 100\% \quad (3.18)$$

El ROI es análogo (y debe compararse) a los tipos de interés de los bancos y al rendimiento de las inversiones en los mercados financieros. Evidentemente, cuanto más alto sea el ROI, más deseable será el proyecto (El-Halwagi, 2011), a menos que se gestione sin necesidad de obtener beneficios (por ejemplo, para cumplir con una normativa medioambiental o de seguridad). En muchos casos, se exige una tasa crítica de rentabilidad del 10 % al 15 % (El-Halwagi, 2011).

3.4.8. Valor presente neto (VPN)

Se define como la suma de todas las utilidades acumuladas en los períodos de operación de la planta, traídas a valor presente. Se calcula como se muestra en la ecuación 3.19, donde i es la tasa de inflación (o de interés) que cuantifica el cambio del valor del dinero con respecto al tiempo, y ACF_n es la utilidad neta para el año n (El-Halwagi, 2012)

$$VPN = \sum ACF_n(1 + i)^{-n} \quad (3.19)$$

3.4.9. Tasa interna de retorno (TIR)

Se expresa como la tasa de interés a la cual el VPN se iguala a cero; es el retorno de la inversión teniendo en cuenta el valor del dinero en el tiempo. Entre más alto es este indicador más atractivo es el proyecto.

La TIR se calcula como indica la ecuación 3.20, llevando el valor presente neto a cero. El resultado de esta ecuación es un porcentaje que es comparado con el porcentaje de interés que se haya definido como más seguro.

$$TIR = \sum ACF_n(1 + i)^{-n} = 0 \quad (3.20)$$

3.4.10. Relación costo/beneficio anual (ACR)

Es un valor uniforme anual que distribuye el valor presente neto en un período de tiempo. Cuando el VPN es negativo hablamos de costo anual, y cuando es positivo, hablamos de beneficio anual

(El-Halwagi, 2012; Romero et al., 2017), esta relación se puede calcular mediante la ecuación 3.21.

$$ACR = VPN \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (3.21)$$

3.5. Investigaciones recientes de evaluaciones económicas de bioprocesos y biorrefinerías

La evaluación de la sostenibilidad en la fase inicial de diseño de las biorrefinerías es esencial para el desarrollo de la economía de base biológica. La dimensión económica se considera a menudo a través de la rentabilidad o el análisis tecno-económico, donde los aspectos técnicos de los proyectos de ingeniería se analizan a partir de indicadores económicos (Palmeros et al., 2016). Hasta el momento, se han realizado varias evaluaciones económicas para diferentes refinerías de biomasa, que pueden extenderse al análisis de los rendimientos de las biorrefinerías basadas en el camarón. La sensibilidad técnico-económica de las biorrefinerías fue introducida en 2017 en una investigación previa desarrollada por los autores para una biorrefinería basada en la palma de aceite. Esta metodología también se aplicó para la producción de biohidrógeno (Pérez-Zúñiga et al., 2016) y aceite de palmiste (Romero et al., 2017); los dos procesos resultaron ser viables, aunque fuertemente sensibles a los costos de las materias primas. También se evaluó una biorrefinería combinada de biomasa de palma y *jatropha* (Niño-Villalobos et al., 2020) bajo criterios tecno-económicos y ambientales. Los resultados de los autores sugirieron que este enfoque de biorrefinería era factible en su aplicación sin generar altos impactos potenciales en el ambiente. Por otro lado, se ha reportado el análisis tecno-económico de la extracción de bioaceite

a partir de semilla de *Calophyllum inophyllum* L. Mediante el uso de solvente, se obtuvo un tiempo de recuperación de la inversión de casi 6 años y un ingreso anual de aceite de 2.097.000 \$/año (Rajendran et al., 2021). Además, se realizó el análisis tecno-económico y se determinó la sostenibilidad ambiental de un proceso de aprovechamiento de la paja de cebada para la producción de bioetanol, de acuerdo con los indicadores obtenidos el proceso es económicamente factible (Kuittinen et al., 2022).

En contribuciones recientes se ha evaluado el rendimiento económico para la conversión de residuos de camarones en productos valiosos. Por ejemplo, Gómez-Ríos et al. (2017) realizaron la evaluación económica de la producción de quitosano en términos de rentabilidad, costos de producción, valor presente neto, tasa interna de retorno y recuperación de la inversión. Encontraron resultados rentables y competitivos de los costos en el contexto geográfico regional. Cogollo-Herrera et al. (2018) desarrollaron la evaluación económica y el análisis de sensibilidad tecno-económica de la producción a gran escala de quitosano a partir de desechos de caparazón de camarón. Las variables tecno-económicas críticas fueron identificadas como los costos de materia prima, el precio de venta del producto y los costos operativos variables normalizados. Las topologías de las biorrefinerías basadas en el camarón han sido marginalmente exploradas en términos económicos, lo que representa una laguna de conocimiento que se cubre en este libro.

3.6. Resultados

La evaluación económica de la topología de biorrefinería de camarón tiene en cuenta las consideraciones presentes en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Consideraciones económicas para la topología de biorrefinería de camarón

Parámetro	Descripción
Vida útil de la biorrefinería	15 años
Producto principal	Carne de camarón
Valor de salvamento	10 % del FCI depreciable
Tiempo de construcción	1 año
Ubicación	Colombia
Tasa impositiva	39 %
Tasa de descuento	8 %
Subsidios (USD/año)	0
Tipo de proceso	Proceso no probado
Control de proceso	Digital
Tipo de proyecto	Planta en terreno no construido
Tipo de suelo	Arcilla suave
Porcentaje de contingencia	20 %
Servicios industriales	Electricidad, vapor, agua
Fluidos de proceso	Sólido-líquido-gas
Método de depreciación	Lineal

Fuente: elaboración propia.

Las tablas 3.4 y 3.5 presentan los costos de las materias primas utilizadas en la biorrefinería de camarón y el precio de venta de los productos, respectivamente. Las materias primas incluyen los camarones frescos, el metabisulfito de sodio que se utiliza como conservante, los disolventes utilizados en las etapas de extracción (etanol y acetona), NaOH y HCl. Estos parámetros económicos se establecen según las cotizaciones de los proveedores internacionales y las cotizaciones locales. La tasa de flujo de estos materiales se deriva del balance de masa en torno a la biorrefinería.

Tabla 3.4. Costo de materias primas y flujos másicos

Materia prima	Flujo másico (t/ año)	costo (USD/kg)
Camarones frescos	4.110	5,70
Etanol	1.270	0,85
HCl	310	0,30
NaOH	257	0,20
Metabisulfito de sodio	83	0,50
Acetona	14	0,76

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.5. Precio de venta de los productos y flujos másicos

Producto	Precio de venta (USD/kg)	Flujo másico (t/año)
Carne de camarón	13,70	2.416
Quitina	17,00	29,22
Quitosano	35,00	23,64
Astaxantina	40,00	0,99

Fuente: elaboración propia.

Los costos de los equipos se calculan según las dimensiones características proporcionadas por el software de simulación Aspen Plus (ver tablas 2.15–2.18). Los costos se obtienen de las páginas web de *Alibaba* y *Matches*, y de las cotizaciones locales; los costos se actualizan con los índices *Chemical Engineering Plant Cost Index* (CEPCI) cuando sea necesario. Dentro de los principales equipos utilizados se tiene una clasificadora, una peladora, una trituradora, secadores de lecho fluido, centrifugadoras y seis reactores. La tabla 3.6 presenta la estimación de la inversión total de capital para el enfoque de la biorrefinería de camarón. El FCI y el WCI son 3,11 MM USD y 1,55 MM USD, respectivamente, lo que supone un TCI de 4,97 MM USD. Los costos asociados al funcionamiento de la biorrefinería de camarón se resumen en la tabla 3.7. Los costos de operación

alcanzan los 26,54 MM USD/año, significativamente mayores que la inversión total. Se estima que el mayor contribuyente a este valor es el costo de la materia prima con 24,70 MM USD al año.

Tabla 3.6. *Inversión total de capital para la biorrefinería de camarón*

Rubro	Total (USD)
Equipos comprados incluyendo envío	796.070,00
Instalación de equipos comprados	159.214,00
Instrumentación y control (instalado)	63.685,60
Tubería (instalado)	159.214,00
Instalaciones eléctricas (instalado)	103.489,10
Edificios (incluyendo servicios)	318.428,00
Instalaciones de servicios	238.821,00
DFCI	1.838.921,70
Terreno	47.764,20
Mejoras de patio	318.428,00
Ingeniería y supervisión	254.742,40
Equipos (R+D)	79.607,00
Gastos de construcción	270.663,80
Gastos legales	7.960,70
Honorarios del contratista	128.724,52
Contingencia	159.214,00
IFCI	1.267.104,62
Inversión fija de capital (FCI)	3.106.026,32
Inversión de capital trabajo (WCI)	1.553.013,16
Costos de arranque (SUC)	310.602,63
Inversión total de capital (TCI)	4.969.642,11

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.7. Costos totales de operación de la
topología de biorrefinería de camarón

Rubro	Total (USD/año)
Materias primas	24.705.088,04
Servicios industriales (U)	249.732,02
Mantenimiento y reparaciones (MR)	155.301,32
Suministros operativos	23.295,20
Mano de obra operativa (OL)	483.600,00
Supervisión directa y trabajo de oficina	72.540,00
Cargos de laboratorio	48.360,00
Patentes y regalías	31.060,26
Total (DPC)	25.768.976,84
Depreciación (D)	305.826,21
Impuestos locales	93.180,79
Seguros	31.060,26
Intereses/renta	49.696,42
Total (FCH)	479.763,69
Overhead (POH)	290.160,00
Gastos generales (GE)	6.634.725,13
Costos totales de operación (OC)	33.173.625,66

Fuente: elaboración propia.

Los indicadores clave de rendimiento en el análisis económico se resumen en la tabla 3.8. La biorrefinería propuesta tiene indicadores moderadamente aceptables a largo plazo. Se calcula un flujo de caja acumulado de 0,26 años⁻¹; para que un proyecto sea atractivo el CCF debe ser <1 (El-Halwagi, 2012), esto sugiere que el proyecto es atractivo por las mayores ganancias obtenidas anualmente en comparación con la inversión inicial. La recuperación total de la inversión considerando la depreciación se logra en alrededor de 5 años. La biorrefinería a base de camarón también mostró valores aceptables de retorno de la inversión (ROI) y tasa interna de retorno (TIR), considerando que en muchos casos las empresas requerían una tasa del 10 % a 15 %. En comparación con el análisis tecno-económico del proceso de producción de

quitosano a partir de residuos de camarón en la cadena lineal por lotes (Cogollo-Herrera et al., 2018), el VPN de la biorrefinería es superior al del proceso lineal, donde se obtuvo un VPN de 0,49 MM USD, lo que hace a este proyecto más atractivo.

Tabla 3.8. *Indicadores económicos para la topología de biorrefinería de camarón*

Indicador económico	Valor	Unidades
GP	1,41	MM USD
DGP	1,10	MM USD
PAT	0,67	MM USD
CCF	0,26	1/y
DPBP	4,62	Y
ROI	13,53	%
VPN	1,12	MM USD

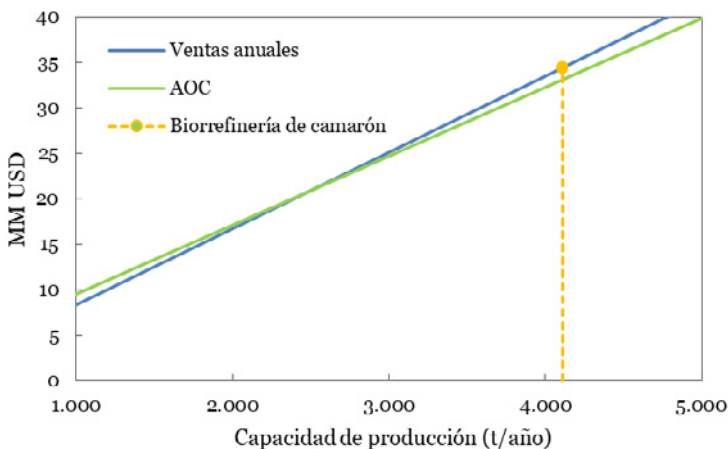
Fuente: elaboración propia.

La evaluación de la sensibilidad técnico-económica se desarrolla variando el costo de la materia prima, el precio medio de venta de los productos, la capacidad de producción y el NVOC para mirar sus efectos sobre los indicadores como el ROI, eficiencia *On-Stream*, PAT y DGP. Este análisis de sensibilidad proporciona información útil sobre el desempeño económico del enfoque de biorrefinería de camarón cuando se efectúan cambios en el mercado y cómo afectan a la rentabilidad global del proceso (El-Halwagi, 2012).

El análisis del punto de equilibrio para la topología de biorrefinería de camarón se muestra en la figura 3.1. Se puede observar que las ventas anuales son mayores que los costos de operación anuales en la capacidad instalada de procesamiento de camarón fresco definida en el capítulo 2 (4.110,28 t/año). El punto de equilibrio es de 2.489 t/año de camarón fresco, por lo que la capacidad de producción puede disminuir hasta un 39 % de la capacidad actual. De acuerdo con esto, se puede afirmar que el proceso es resistente

a los cambios en la capacidad de producción, lo que es beneficioso en caso de una disminución en la disponibilidad de camarones frescos como consecuencia del cambio climático o de las plagas; las condiciones del mercado también pueden requerir la reducción temporal de la producción para mantener un determinado precio de venta o para mantenerse dentro del nivel de la demanda (El-Halwagi, 2012). La estrecha distancia entre las líneas que representan las ventas anuales y los AOC, sugiere que la rentabilidad varía débilmente en comparación con los cambios en la capacidad de producción, lo que puede asociarse a la gran contribución de los costos variables (materia prima, servicios públicos, etc.) en la estimación de los costos totales de producción. Cualquier aumento de la capacidad de producción solo provoca un ligero incremento de la rentabilidad, ya que los costos de producción aumentan en la misma proporción.

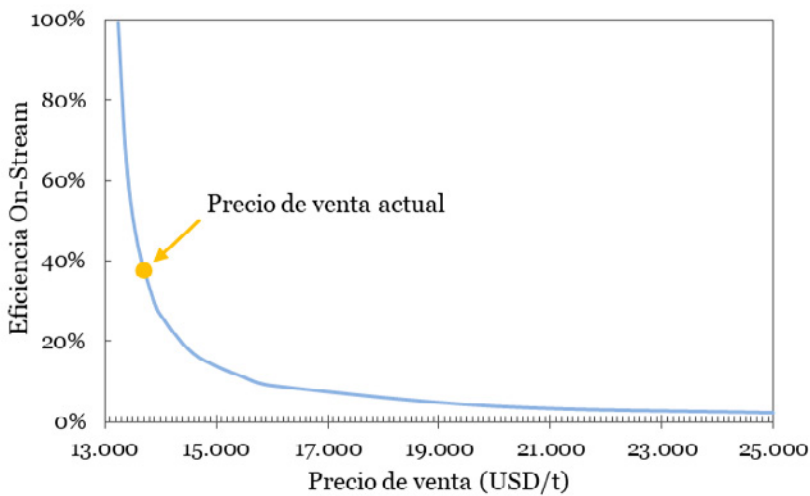
Figura 3.1. Análisis del punto de equilibrio para la topología de biorrefinería de camarón



Fuente: elaboración propia.

En la figura 3.2 se muestra el análisis de sensibilidad para la eficiencia *On-Stream* en el punto de equilibrio con respecto a cambios en el precio de venta de los productos. Se considera un precio medio de venta de la carne de camarón porque representa el 94 % del total de los productos vendidos. Se determinó un precio de venta crítico de 14.500 USD/t; por debajo de este valor la eficiencia *On-Stream* es muy sensible a los cambios en el precio de venta. Un cambio mínimo en el precio de cualquier producto generaría un cambio repentino en la eficiencia *On-Stream* haciendo que se requiera una alta capacidad de producción para que el proceso sea rentable.

Figura 3.2. Efecto del precio de venta de la carne de camarón sobre la eficiencia *On-Stream* en el punto de equilibrio



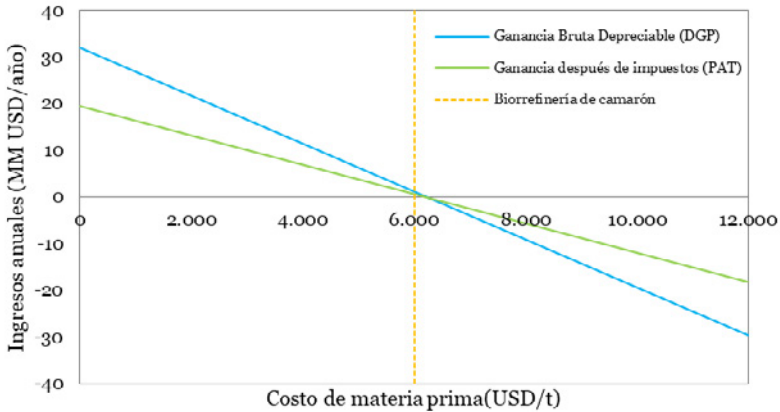
Fuente: elaboración propia.

Cuando el precio de venta está acotado entre 14.500 y 17.500 USD/t, la biorrefinería tiene un nivel aceptable de estabilidad en la eficiencia *On-Stream* en el punto de equilibrio para un amplio

rango de precios. El precio de venta actual está dentro de la zona sensible a los cambios en el precio de venta de la carne, por lo cual se encuentra en una posición de riesgo en el escenario en que se disminuya el precio de venta de los productos. Por encima de 17.500 USD/t, la dependencia del precio de venta de la eficiencia en flujo es débil, manteniendo un valor casi constante.

El efecto de los costos de las materias primas sobre la rentabilidad de la biorrefinería de camarón se muestra en la figura 3.3. Para este análisis de sensibilidad, los costos de la materia prima se refieren al costo de la materia prima total por cada tonelada de camarón fresco procesado. Los resultados revelan que el proceso es altamente sensible a los cambios en los costos de la materia prima, alcanzando un punto crítico cercano a 6.225,16 USD por tonelada de camarón fresco procesado; por encima de este valor el proceso deja de ser rentable. El costo actual de la materia prima es de 6.010,56 USD/t, por lo que el margen al que puede aumentar es muy ajustado, con un valor del 3,5 %. Las sustancias más influyentes en el costo total de la materia prima por cada tonelada de camarones procesada son los precios del camarón cosechado y el etanol. Para una producción de quitosano de cadena lineal a partir del exoesqueleto de camarón, el proceso también tiene una alta sensibilidad a los costos asociados a la compra de materias primas, aunque puede soportar un incremento del 50 % sin tener pérdidas (Kuittinen, 2022). Lo anterior puede atribuirse a que la principal materia prima utilizada es el caparazón de camarón, la cual es de bajo costo.

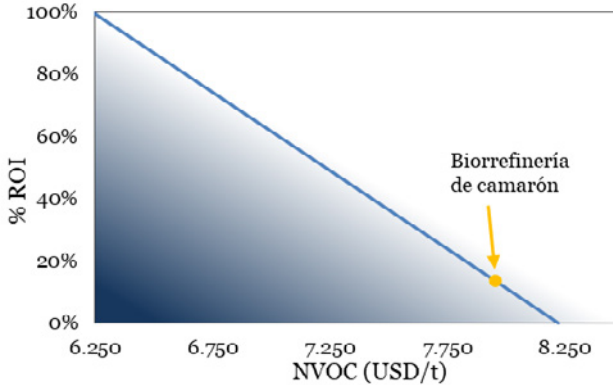
Figura 3.3. Efecto del costo de la materia prima sobre rentabilidad de la topología de biorrefinería de camarón



Fuente: elaboración propia.

Las figuras 3.4 y 3.5 muestran el efecto de los costos operativos variables (NVOC) sobre el retorno de la inversión y el período de recuperación de la inversión, respectivamente. Los resultados permiten observar que los NVOC alcanzan un valor crítico cercano al 8.222,43 USD/t donde el ROI se vuelve nulo y el PBP tiende ser paralelo al eje de la ordenada. Con valores de NVOC inferiores a 6.240,3 USD/t, el proceso alcanza un ROI superior al 100 % y el PBP muestra resultados inferiores a 0,5 años.

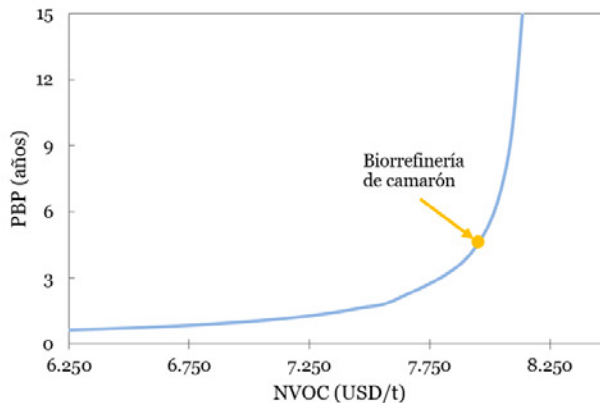
Figura 3.4. Efecto de los costos variables de operación sobre el ROI para la topología de biorrefinería de camarón



Fuente: elaboración propia.

En el caso de la biorrefinería, el porcentaje de ROI es muy sensible a los cambios en el NVOC, que pueden producirse principalmente por cambios en el costo de la materia prima o de los servicios públicos. El NVOC actual es de 7.954,16 USD/t; un cambio de solo 268 USD/t podría hacer que el proyecto perdiera su rentabilidad. Al comparar la biorrefinería con la producción de quitosano en cadena lineal (Kuittinen et al., 2022), el proceso lineal tolera una variación en los costos de operación de hasta el 50 % de su valor actual, mientras que la biorrefinería solo tolera el 3 %. Esto indica que la biorrefinería es menos estable que el proceso lineal en términos económicos con respecto a los NVOC.

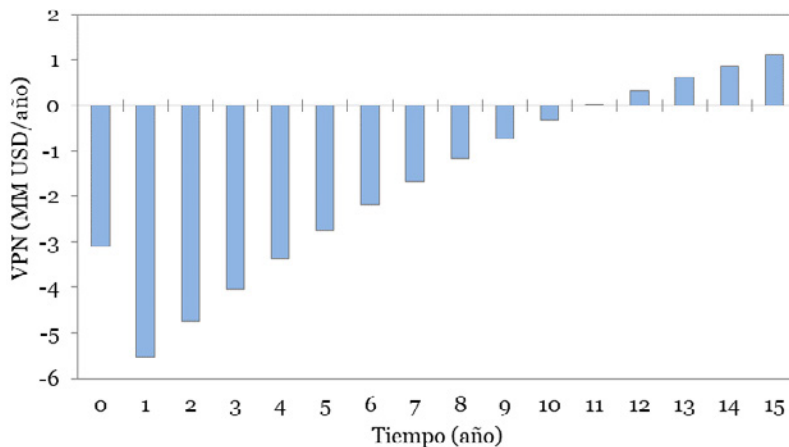
Figura 3.5. Efecto de los costos variables de operación sobre el PBP para la topología de biorrefinería de camarón



Fuente: elaboración propia.

El comportamiento del VPN durante los primeros 15 años de vida de la planta se muestra en la figura 3.6. La inversión producirá beneficios a partir del año 12 y alcanzará un VPN de 1,12 MM USD al final del proyecto. A pesar del valor positivo del VPN después del segundo año, el VPN acumulado alcanza valores positivos cuatro años antes de la finalización del proyecto, lo que puede influir en la decisión de invertir o no en la incorporación de cadenas lineales adicionales para la recuperación de astaxantina y quitina, y la producción de quitosano dentro del procesamiento convencional de camarones para una planta de 15 años.

Figura 3.6. *Tendencia del valor presente neto para la biorrefinería de camarón*



Fuente: elaboración propia.

3.7. Conclusiones

Para un flujo de 4.534 t/año de camarón fresco y considerando los supuestos definidos, la planta puede operar bajo la máxima capacidad de producción con indicadores económicos aceptables como un valor actual neto de 3,76 MM USD y una tasa interna de retorno cerca del 23,6 %. El costo de la materia prima representa una variable crítica para este proceso ya que solo tolera un incremento de 260 USD en los precios promedio de la materia prima antes de que el proceso deje de ser rentable; los cambios en los precios del camarón fresco y del etanol tienen un mayor impacto en los costos de materia prima. Según los resultados del análisis de sensibilidad, se recomienda que el precio medio de venta de los productos se sitúe entre 12.500 USD/t y 13.500 USD/t. Para aumentar la rentabilidad de la topología y restarles sensibilidad a las variables económicas

observadas, se recomienda disminuir los costos de producción o aumentar los precios de venta de uno o varios de los productos obtenidos, esto último supeditado por las dinámicas del mercado.

Referencias

- Cogollo-Herrera, K., Bonfante-Álvarez, H., De Ávila-Montiel, G., Barros, A. & González-Delgado, Á. (2018). Techno-economic sensitivity analysis of large-scale chitosan production process from shrimp shell wastes. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 2179–2184. doi: 10.3303/CET1870364.
- El-Halwagi, M. (2011). Overview of Process Economics. *Sustain. Des. Through Process Integr.* 15–61. doi: 10.1016/b978-1-85617-744-3.00002-3.
- El-Halwagi, M. (2012). *Sustainable design through process integration: fundamentals and applications to industrial pollution prevention, resource conservation, and profitability enhancement*. Butterworth-Heinemann.
- Gómez-Ríos, D., Barrera-Zapata, R. & Ríos-Esteva, R. (2017). Comparison of process technologies for chitosan production from shrimp shell waste: A techno-economic approach using Aspen Plus®. *Food and Bioproducts Processing*, 103, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.02.010>.
- González-Delgado, Á., Kafarov, V. & El-Halwagi, M. (2015). Development of a topology of microalgae-based biorefinery: process synthesis and optimization using a combined forward-backward screening and superstructure approach. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(8), 2213–2228. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-0946-5>.
- Kuittinen, S., Hietaharju, J., Bhattarai, I., Hassan, M., Kupiainen, L., Kangas, J., Tanskanen, J. & Pappinen, A. (2022). Technoeconomic analysis

- and environmental sustainability estimation of bioalcohol production from barley straw. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102427>.
- Niño-Villalobos, A., Puello-Yarce, J., González-Delgado, Á., Ojeda, K. & Sánchez-Tuirán, E. (2020). *Biodiesel and Hydrogen Production in a Combined Palm and Jatropha Biomass Biorefinery: Simulation, Techno-Economic, and Environmental Evaluation*. ACS Omega.
- Palmeros, M., Osseweijer, P. & Posada, J. (2016). Sustainable biorefineries, an analysis of practices for incorporating sustainability in biorefinery design. *Industrial Crops and Products*, 106, 105-123. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.08.052>.
- Pérez-Zúñiga, D., Luna-Barrios, E., Peralta-Ruiz & González-Delgado, Á. (2016). Techno-economic sensitivity of bio-hydrogen production from empty palm fruit bunches under Colombian conditions. *Chemical Engineering Transactions*, 52, 1117–1122. doi: 10.3303/CET1652187.
- Peters, M., Timmerhaus, K. & West, R. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers*. McGraw-Hill.
- Rajendran, N., Gurunathan, B. & Ebenezer, A. (2021). Optimization and technoeconomic analysis of biooil extraction from *Calophyllum inophyllum* L. seeds by ultrasonic assisted solvent oil extraction. *Industrial Crops and Products*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113273>.
- Romero, J., Vergara, L., Peralta-Ruiz, Y. & González-Delgado, A. (2017). A techno-economic sensitivity approach for development of a palm-based biorefineries in Colombia. *Chemical Engineering Transactions*, 57, 13–18. <https://doi.org/10.3303/CET1757003>.



Capítulo IV.

**Evaluación ambiental
asistida por computador de
una biorrefinería de camarón**

El factor ambiental hace parte de los pilares de la sostenibilidad y, por lo tanto, una biorrefinería debe tener un comportamiento amigable con el ambiente. La evaluación ambiental permite determinar los posibles impactos ambientales de una actividad industrial presente o futura con potencial para causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites establecidos en las disposiciones de protección de los ecosistemas (Pardo-Cárdenas et al., 2013). El análisis de los impactos ambientales de un proceso permite identificar puntos de mejora ambiental, y sirve como herramienta para la toma de decisiones, así como para cuantificación de los beneficios ambientales asociados a la transformación de una materia prima en un producto final.

Existen diferentes metodologías, herramientas y técnicas para desarrollar un análisis de impactos ambientales de procesos que incluyen el algoritmo de reducción de residuos (WAR, por sus siglas en inglés), el método de minimización de impacto ambiental (MEIM, por sus siglas en inglés), la metodología AHÍ, la herramienta EFRAT, el análisis de ciclo de vida (ACV), la herramienta para la reducción y evaluación de impactos químicos y otros impactos ambientales (TRACI), entre otros.

4.1. Algoritmo de reducción de residuos

El algoritmo de reducción de residuos WAR (Waste Algorithm Reduction, por sus siglas en inglés) es una de las herramientas más implementadas para realizar este tipo de análisis, fue desarrollado por el *National Risk Management Research Laboratory* de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) (Meramo-Hurtado & Ojeda-Delgado, 2018). El algoritmo WAR introduce el concepto de impacto ambiental potencial (PEI), y se basa en un balance de PEI, el cual es análogo a un balance de masa o de energía. El balance implica el flujo de un impacto ambiental a través de los límites del sistema, el cual puede ser debido a la masa o la energía que cruza dichos límites. Esta herramienta se emplea para evaluar los PEI producidos por las emisiones químicas en las categorías de impacto, pues tiene en cuenta el peso de cada sustancia química que interviene en el proceso. El algoritmo WAR predice y compara la contaminación de casos o procesos industriales con el fin de disminuir los impactos ambientales y reducir los componentes no deseados (Xin et al., 2021). Los PEI se evalúan bajo ocho categorías de impacto: cuatro atmosféricas, de las cuales dos son atmosféricas locales y las otras dos son atmosféricas globales; y cuatro toxicológicas, de las cuales dos están relacionadas con la salud humana, y dos con el entorno. A continuación, se definen cada una de estas categorías (Meramo-Hurtado & Ojeda-Delgado, 2018).

4.1.1. Potencial de toxicidad humana por ingestión (HTPI)

Permite evaluar la toxicidad de sustancias químicas que existen como sólido o líquido a una temperatura de 273 K y 1 atmósfera de presión (Jaramillo, 2011). Se estima a partir del valor de la dosis letal por ingestión, que mataría al 50 % de una muestra de

población de ratas (LD_{50}), como indica la ecuación 4.1. El LD_{50} debe estar dado en unidades de mg de sustancia química / kg rata.

$$HPTI = \frac{1}{LD_{50}} \quad (4.1)$$

4.1.2. Potencial de toxicidad humana por inhalación o exposición dérmica (HTPE)

Se determina para una sustancia química que existe como un gas a una temperatura de 273 K y 1 atmósfera de presión (Xin et al., 2021); sin embargo, algunas sustancias químicas tienen valores asignados tanto para la categoría HTPI como para HTPE. Este indicador se calcula basado en el uso del (TLV), que es la concentración límite de una sustancia en el aire, a la cual una persona puede estar expuesta durante 8 horas diarias y 40 horas a la semana, sin manifestar ningún efecto adverso. Se estima por el uso de valores umbrales, de 8 horas según lo recomendado por la Administración de Seguridad y Salud en el Trabajo (OSHA), La Conferencia Americana de Industrias Gubernamentales (ACGIH) y el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud (NIOSH). Este valor es la medida adecuada para la comparación de productos químicos que suponen una amenaza para la salud humana por inhalación y exposición dérmica. Las agencias mencionadas anteriormente han evaluado las sustancias químicas de preocupación significativa. La ecuación 4.2 muestra la expresión para calcular el HTPE, donde el valor para el TLV está dado en unidades de mg/m^3 (Young & Cabezas, 1999).

$$HPTE = \frac{1}{TLV} \quad (4.2)$$

4.1.3. Potencial de toxicidad acuática (ATP)

Se determina por el valor de la concentración letal que causa la muerte del 50 % de una sola especie representativa de peces, *Pimephales promelas* (carpitas cabezonas). Esta especie fue elegida debido a su aceptación como un indicador acuático universal y por prevalencia de los datos. La ecuación 4.3 muestra la expresión para calcular el ATP, donde las unidades de la LC_{50} están en mg/L (Young & Cabezas, 1999).

$$ATP = \frac{1}{LC_{50}} \quad (4.3)$$

4.1.4. Potencial de toxicidad terrestre (TTP)

Se determina mediante el uso de los datos toxicológicos de una especie terrestre, la rata. Esta especie fue elegida debido a su aceptación como una especie indicadora terrestre y por su prevalencia de datos. Los datos se presentan en forma de una dosis letal que mata al 50 % de los especímenes por ingestión oral, LD_{50} oral (Jaramillo, 2011; Young & Cabezas, 1999). Este es el mismo valor que se utiliza para estimar el potencial de toxicidad humana por ingestión, como se muestra en la ecuación 4.4.

$$TTP = \frac{1}{LD_{50}} \quad (4.4)$$

4.1.5. Potencial de agotamiento del ozono (ODP)

Esta categoría tiene en cuenta la descomposición de los productos en la atmósfera. Se determina mediante la comparación entre la tasa a la que una unidad de masa de un producto químico reacciona

con el ozono para formar oxígeno molecular, y la tasa a la que una unidad de masa de CFC-11 (triclorofluorometano) reacciona con el ozono para formar oxígeno molecular (Jaramillo, 2011). En general, para un producto, el ODP calculado en kilogramos de CFC-11 equivalente se define por la ecuación 4.5, donde $\delta[\text{O}_3]_i$ se refiere al agotamiento de ozono global producido por una unidad del gas i , $\delta[\text{O}_3]\text{CFC-11}$ es el agotamiento de ozono producido por una unidad de CFC-11 y m_i es la masa (kg) del gas emitido (Jaramillo, 2011; Young & Cabezas, 1999).

$$\text{ODP} = \frac{\delta[\text{O}_3]_i}{\delta[\text{O}_3]\text{CFC-11}} m_i \quad (4.5)$$

4.1.6. Potencial de calentamiento global (GWP)

Esta categoría de impacto tiene en cuenta el deterioro de los productos químicos en la atmósfera durante un período de tiempo. Se determina mediante la comparación entre la cantidad de radiación infrarroja que una unidad de masa de una sustancia química puede absorber en su tiempo de vida atmosférico y la cantidad de radiación infrarroja que una unidad de masa de dióxido de carbono puede absorber durante el mismo período de tiempo (Der Verband Österreichischer Ziegelwerke, 2016). El GWP se mide en kilogramos de CO_2 equivalentes y puede ser calculado mediante la ecuación 4.6, donde a_i y a_{CO_2} es la absorción de calor por radiación por unidad de gas de efecto invernadero i y por unidad de dióxido de carbono, $c_i(t)$ y $c_{\text{CO}_2}(t)$ es la concentración del gas de efecto invernadero i y concentración de dióxido de carbono en un tiempo t después de haberse liberado, t es el número de años sobre los cuales se desea evaluar el GWP, que por lo general se toma como 100 años y m_i es la masa (kg) del gas emitido (Jaramillo, 2011; Young & Cabezas, 1999).

$$GWP = \frac{\int_0^t a_i c_i(t) dt}{\int_0^t a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt} m_i \quad (4.6)$$

4.1.7. Potencial de oxidación fotoquímica (PCOP) o potencial de formación de smog.

El smog es una nube baja de humos y polvo en suspensión que afecta los centros urbanos y algunas zonas industriales. El potencial de formación de smog se determina mediante la comparación de la tasa a la que una unidad de masa de producto químico reacciona con un radical hidroxilo (OH⁻) respecto a la velocidad a la que una unidad de masa de etileno reacciona con un radical hidroxilo (OH⁻) (Der Verband Österreichischer Ziegelwerke, 2016). Estos valores han sido determinados para muchos hidrocarburos de bajo y mediano peso molecular. La PCOP (kg C₂H₄-equiv.) puede ser calculada mediante la ecuación 4.7, donde a_i es el cambio en la concentración de ozono debido a un cambio en la emisión de un compuesto orgánico volátil i , $a_{C_2H_4}$ se refiere a este mismo cambio, pero respecto a la emisión de etileno, $b_i(t)$ es la emisión integrada de un compuesto orgánico volátil i hasta un tiempo t , $b_{C_2H_4}(t)$ se refiere a esta última condición respecto al etileno y m_i es la masa (kg) del compuesto orgánico volátil emitido. Para esta categoría de impacto ambiental, al contrario que para el deterioro de la capa de ozono, la presencia de ozono no es beneficiosa, ya que el ozono en capas bajas de la atmósfera incrementa la formación de smog (Jaramillo, 2011; Young & Cabezas, 1999).

$$PCOP = \frac{\frac{a_i}{b_i(t)}}{\frac{a_{C_2H_4}}{b_{C_2H_4}(t)}} m_i \quad (4.7)$$

4.1.8. Potencial de acidificación (AP)

Se determina mediante la comparación de la velocidad de liberación de protones (H^+) en la atmósfera promovida por un producto químico, con respecto a la tasa de liberación de H^+ en la atmósfera promovido por el SO_2 (Der Verband Österreichischer Ziegelwerke, 2016). El AP ($kg\ SO_2$ -equiv.) se calcula como se muestra en la ecuación 4.8, donde V_i es el potencial de acidificación del componente i , V_{SO_2} es el potencial de acidificación del SO_2 , M_i es la unidad de masa de la sustancia i , M_{SO_2} es la unidad de masa del SO_2 y m_i es la masa (kg) de un componente significativo i emitido.

$$AP = \frac{\frac{V_i}{M_i}}{\frac{V_{SO_2}}{M_{SO_2}}} m_i \quad (4.8)$$

Por otro lado, el algoritmo WAR incluye dos índices para evaluar el impacto ambiental de un proceso químico. El primero mide el impacto ambiental potencial emitido por el proceso a sus alrededores (impactos de salida). Los PEI de salida por unidad de tiempo permiten identificar el sitio apropiado para una planta conforme a las emisiones del proceso y los límites de regulación ambiental, mientras que los PEI de salida por unidad de masa permiten identificar la eficiencia de la utilización de las materias primas. Los impactos de salida permiten resolver preguntas acerca de la eficiencia ambiental externa de un proceso, es decir, la habilidad del proceso para obtener productos finales a un mínimo potencial de impacto ambiental de descarga. Las ecuaciones 4.9 y 4.10 muestran las expresiones para calcular los PEI de salida por unidad de tiempo y por unidad de masa, respectivamente (Jaramillo, 2011; Young & Cabezas, 1999).

El segundo índice mide la generación de impactos ambientales potenciales dentro de los límites del proceso (impactos generados), los cuales permiten conocer la eficiencia ambiental interna del proceso (cantidad de impacto ambiental que se está consumiendo o generando). Estos se pueden cuantificar por unidad de masa, que permite comparar procesos y productos basados en la cantidad de nuevos impactos ambientales potenciales generados; mientras el PEI generado por unidad de tiempo es un indicador útil para comparar procesos basados en su velocidad de generación de impactos. Las ecuaciones 4.11 y 4.12 muestran las expresiones para calcular los PEI generados por unidad de tiempo y por unidad de masa respectivamente (Jaramillo, 2011; Young & Cabezas, 1999).

$$\hat{i}_{out}^{(t)} = \dot{i}_{out}^{(cp)} + \dot{i}_{out}^{(ep)} + \dot{i}_{we}^{(cp)} + \dot{i}_{we}^{(ep)} = \sum_j^{cp} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k X_{kj} \Psi_k + \sum_j^{ep-g} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k X_{kj} \Psi_k \quad (4.9)$$

$$\hat{i}_{out}^{(t)} = \frac{\dot{i}_{out}^{(cp)} + \dot{i}_{out}^{(ep)} + \dot{i}_{we}^{(cp)} + \dot{i}_{we}^{(ep)}}{\sum_p P_p} = \frac{\sum_j^{cp} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k X_{kj} \Psi_k + \sum_j^{ep-g} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k X_{kj} \Psi_k}{\sum_p P_p} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \hat{i}_{gen}^{(t)} &= \dot{i}_{out}^{(cp)} - \dot{i}_{in}^{(cp)} + \dot{i}_{out}^{(ep)} - \dot{i}_{in}^{(ep)} + \dot{i}_{we}^{(cp)} + \dot{i}_{we}^{(ep)} \\ &= \sum_j^{cp} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k X_{kj} \Psi_k \\ &\quad - \sum_j^{cp} \dot{M}_j^{(in)} \sum_k X_{kj} \Psi_k \\ &\quad - + \sum_j^{ep-g} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k X_{kj} \Psi_k \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \hat{i}_{gen}^{(t)} &= \frac{\dot{i}_{out}^{(cp)} - \dot{i}_{in}^{(cp)} + \dot{i}_{out}^{(ep)} - \dot{i}_{in}^{(ep)} + \dot{i}_{we}^{(cp)} + \dot{i}_{we}^{(ep)}}{\sum_p P_p} \\ &= \frac{\sum_j^{cp} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k X_{kj} \Psi_k - \sum_j^{cp} \dot{M}_j^{(in)} \sum_k X_{kj} \Psi_k - + \sum_j^{ep} \dot{M}_j^{(out)} \sum_k X_{kj} \Psi_k}{\sum_p P_p} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Donde $i_{out}^{(cp)}$ y $i_{in}^{(cp)}$ son las velocidades de ingreso y salida de PEI del sistema debido a las interacciones químicas que ocurren dentro del sistema $i_{out}^{(ep)}$ y $i_{in}^{(ep)}$ son las velocidades de ingreso y salida de PEI del sistema debido a los procesos de generación de energía en el sistema; $i_{we}^{(cp)}$ y $i_{we}^{(ep)}$ son los impactos de salida del sistema como resultado de la liberación de energía no aprovechada y a los procesos químicos que ocurren dentro del sistema respectivamente; $M_j^{(in)}$ y $M_j^{(out)}$ son los flujos másicos de entrada y salida de la corriente j ; X_{kj} es la fracción másica del componente k en la corriente j ; Ψ_k es el impacto ambiental potencial global de la sustancia química k ; P_p es el flujo másico del producto p (Young & Cabezas, 1999).

El software WARGUI permite determinar el impacto ambiental de un proceso siguiendo el algoritmo WAR. El software contiene una base de datos de los productos químicos, a los que se les relaciona puntuaciones de impacto ambiental provenientes de fuentes gubernamentales y no gubernamentales. La interfaz de WARGUI permite introducir información de diseño de varios procesos con el fin de realizar una comparación de carácter ambiental. La información requerida para dicha comparación incluye los productos químicos utilizados, los flujos másicos de las corrientes que entran y salen del proceso, y el uso de energía dentro del mismo.

Algunas sustancias químicas no suelen estar disponibles en la base de datos del software. Por lo tanto, la información necesaria para las categorías de impacto se debe buscar en la literatura científica o en las hojas de seguridad (MSDS) de las sustancias químicas e ingresarlas directamente al software. En el supuesto que algún dato toxicológico de la sustancia aparezca en la literatura como “>###”, significa que la prueba terminó con la dosis máxima suministrada sin que se obtuviera el valor deseado.

4.2. Investigaciones recientes de evaluaciones ambientales de biorprocesos y biorrefinerías

En la literatura se encuentran diferentes contribuciones dirigidas a evaluar el rendimiento ambiental de biorrefinerías; por ejemplo, Herrera-Aristizábal et al. (2018) cuantificaron los impactos ambientales de una biorrefinería de palma en el Norte de Colombia empleando el algoritmo de reducción de residuos. Los resultados indicaron que el proceso es beneficioso para el ambiente al consumir impactos ambientales. Koch et al. (2020) evaluaron el ciclo de vida de la producción de nanopartículas de lignina a partir de paja de trigo dentro de una biorrefinería innovadora. Los resultados mostraron que el contenido de etanol en los residuos líquidos de la recuperación del solvente es el punto crítico y lo que causa mayor efecto en el rendimiento ambiental de este proceso. Por su parte, Niño-Villalobos et al. (2020) realizaron la evaluación ambiental de una biorrefinería combinada de biomasa de palma y jatropha para la producción de biodiesel e hidrógeno empleando el algoritmo WAR. Los resultados mostraron que la biorrefinería combinada no causa impactos negativos significativos en el medio ambiente; el potencial de acidificación contribuyó en mayor medida a los impactos ambientales, dado el uso de combustibles fósiles en las etapas de calefacción. Además, Barlow et al. (2016) realizaron el análisis de ciclo de vida de una biorrefinería de algas encontrando que el tratamiento de las aguas residuales reduce el potencial de calentamiento global (GWP). Geissler et al. (2021) evaluaron una biorrefinería a partir de material lignocelulósico desde el punto de vista ambiental, económico y energético, la evaluación ambiental tuvo en cuenta el crecimiento y cosecha de la materia prima (rastrojo de maíz), transporte, procesamiento y operación de la biorrefinería. Por su parte, Saral et al. (2022) desarrollaron un

análisis económico y ambiental de una biorrefinería de algas para la producción de combustibles y coproductos, el análisis ambiental se realizó mediante ACV y tuvo en cuenta las emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 y N_2O) con el fin de verificar el potencial de calentamiento global. Por otro lado, Aparecida et al. (2022) realizaron análisis técnico-económico-ambiental a la producción microbiana de aceite integrada a una biorrefinería de caña de azúcar de bioetanol, con este tipo de análisis fue posible identificar cuellos de botella que proporcionan información sobre la sostenibilidad y viabilidad del proceso.

4.3. Resultados

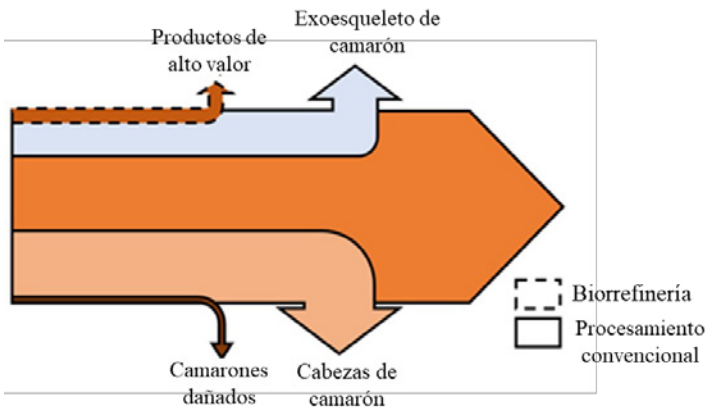
Para el análisis ambiental de la topología de biorrefinería de camarón se definieron dos casos de estudio:

- I. Caso 1. Topología sin considerar los impactos ambientales del flujo de los productos.
- II. Caso 2. Topología considerando los impactos ambientales del flujo de los productos.

Estos casos de evaluación se analizan utilizando combustibles líquidos de origen fósil como fuente de energía para cuantificar los efectos sobre el ambiente y la salud de las personas. La figura 4.1 muestra el diagrama *Sankey* de las contribuciones de los residuos y productos del procesamiento del camarón al ambiente. El procesamiento convencional de camarón genera 49,02 kg/h de residuos adicionales en comparación con la topología de biorrefinería, que es el tercer factor que más contribuye en los impactos ambientales. La transformación del exoesqueleto de camarón en productos de alto valor (quitina, quitosano y astaxantina) es prometedora desde el

punto de vista ambiental debido a la mayor tasa de valorización de recursos. Sin embargo, es necesario el análisis completo mediante el algoritmo WAR para demostrar si el uso de agentes químicos durante la recuperación de quitina y astaxantina, así como la producción de quitosano, afectan al rendimiento ambiental global de la biorrefinería de camarón.

Figura 4.1. Diagrama Sankey de las contribuciones ambientales de los residuos de camarón y los productos de alto valor

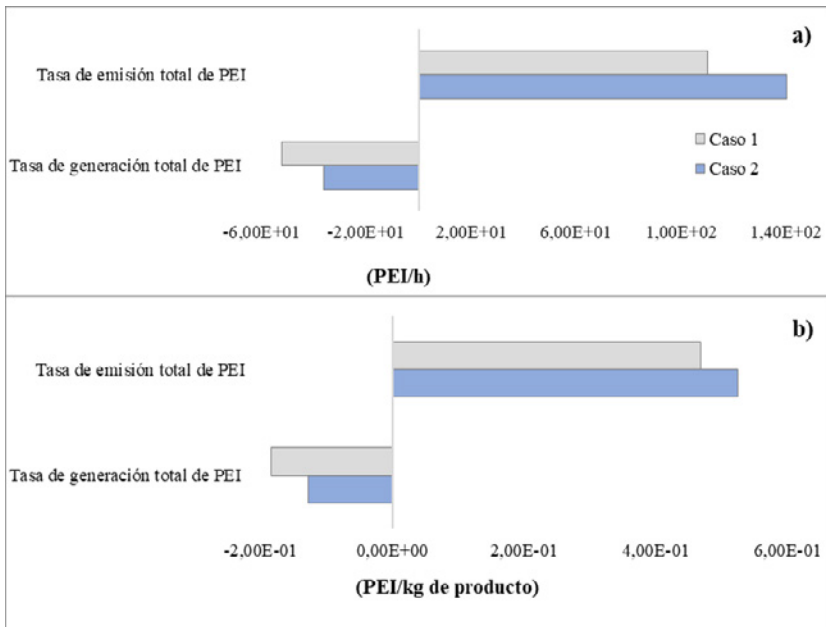


Fuente: elaboración propia.

La figura 4.2 muestra el rendimiento ambiental de la topología de biorrefinería de camarón para los dos casos de estudio. La generación total de PEI alcanza valores negativos para los casos 1 y 2 (-52,1 y -36,1 PEI/h, respectivamente), lo que sugiere que los productos de alto valor generan menos impactos en el ambiente que los camarones frescos. Este consumo de PEI justifica la transformación de los camarones en quitina, quitosano, astaxantina y carne bajo el concepto de biorrefinería. El caso 2 aumenta la generación de PEI en un 30 % comparado con el caso 1, lo que indica lo amigable que son los productos con el ambiente; sus contribuciones de PEI no

son tan altas como se requiere para cambiar la generación total de PEI a valores positivos. En cuanto a la tasa de emisión total de PEI, se observan valores más bajos en comparación con trabajos anteriores de producción de quitosano a partir de desechos de camarón desarrollados por los autores (Meramo-Hurtado et al., 2020). La tasa de salida de PEI se estima en 15 PEI/kg de quitosano para producir 12.152 toneladas/año de quitosano a partir del exoesqueleto de camarón; en esta topología, la tasa de salida de PEI se calcula en $4,68E-01$ y $5,24 E-01$ PEI/kg de productos. Estos valores menores a 1 confirman el buen comportamiento ambiental de la topología desarrollada.

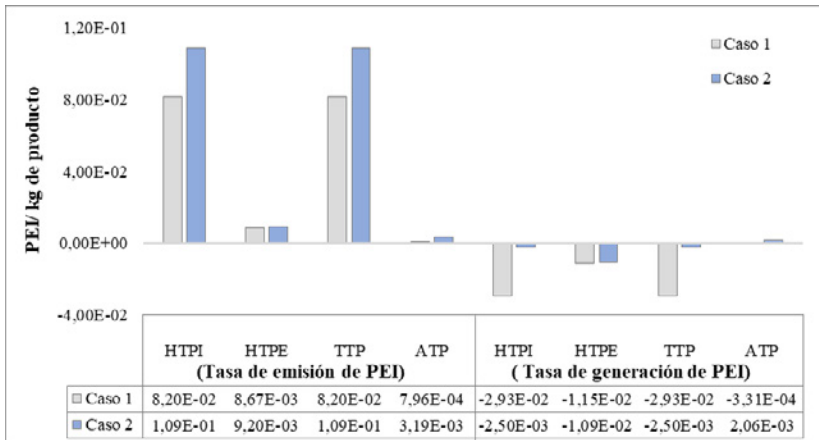
Figura 4.2. Rendimiento ambiental global de la topología de biorrefinería de camarón: a) PEI por hora y b) PEI por masa de productos



Fuente: elaboración propia.

El resultado para los impactos toxicológicos de emisión y generados/consumidos para la topología de biorrefinería de camarón se muestra en la figura 4.3. La toxicidad humana por ingestión (HTPI) y la toxicidad terrestre (TTP) alcanzan las estimaciones más altas de producción y generación de PEI. Este hallazgo se debe a la producción no deseada de sales de cloruro, seguida del contenido de aminoácidos en las corrientes de camarones; estos últimos con una dosis letal oral media para ratas (LD_{50}) más alta que las sales. Los resultados de la categoría de toxicidad humana por exposición (HTPE) se atribuyen a la producción de ácido fosfórico en la etapa de desmineralización, así como al hidróxido de sodio utilizado en las neutralizaciones entre etapas. Ambas sustancias tienen valores bajos de valor límite umbral (TLV) (Patnaik, 2007). Por su parte, los bajos valores del potencial de toxicidad acuática (ATP) sugieren que la manipulación de los compuestos de la biorrefinería de camarón es menos perjudicial para los ecosistemas acuáticos que para los terrestres. La carne de camarón y el quitosano se identifican como responsables de este aumento debido a sus mayores puntuaciones toxicológicas normalizadas en comparación con la quitina y la astaxantina. Para la mayoría de las categorías, la generación de PEI es negativa, lo que confirma el buen rendimiento de la biorrefinería de camarón; sin embargo, la toxicidad acuática alcanza un valor positivo en el caso 2. Como el quitosano es más tóxico que los componentes del camarón en términos de concentración letal (LC_{50}), se esperaba una generación de PEI (+) en lugar de un consumo (-) dentro del proceso para la categoría ATP.

Figura 4.3. Impactos toxicológicos de la topología de biorrefinería de camarón

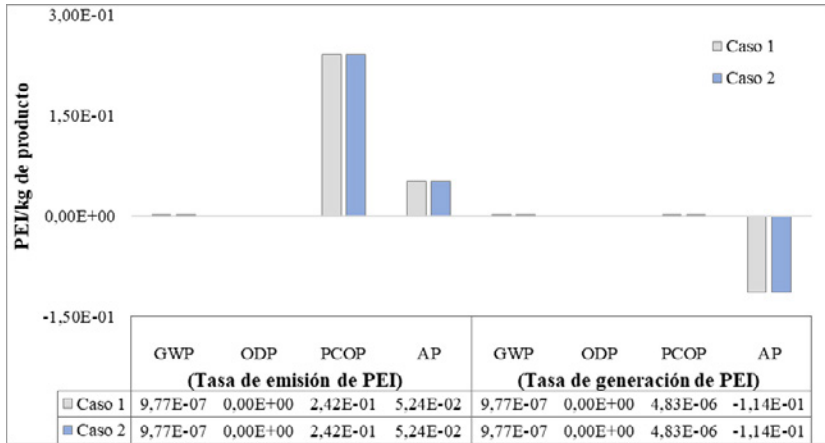


Fuente: elaboración propia.

La figura 4.4 muestra los PEI que salen o que son emitidos por el sistema, así como los impactos generados por cada categoría de impacto atmosférico. La salida total de PEI alcanza el valor más alto para la categoría de potencial de oxidación fotoquímica (PCOP), lo que representa el 82 % del total de impactos atmosféricos. Este resultado está asociado a la presencia de componentes orgánicos volátiles que salen del sistema a través de corrientes residuales, como el etanol y la acetona, utilizados durante las etapas de despigmentación. Los impactos del potencial de acidificación (AP) se estiman en $5,24E-02$ PEI/kg para ambos casos. Como esta categoría reporta el mismo valor para los casos 1 y 2, se esperaba que no haya contribuciones de la quitina, el quitosano, la carne y la astaxantina a las emisiones de ácidos a la atmósfera. Para la topología de biorrefinería de camarón, el principal responsable de la acidificación es el ácido clorhídrico utilizado en las etapas de desmineralización y neutralización; por lo tanto, se deben considerar agentes ecológicos

alternativos en futuros trabajos para reducir los posibles problemas ambientales del procesamiento del exoesqueleto de camarón. En este campo, se han realizado avances significativos para probar disolventes verdes a escala de laboratorio como los ácidos eutécticos profundos (Sivagnanam et al., 2018; Hong et al., 2018).

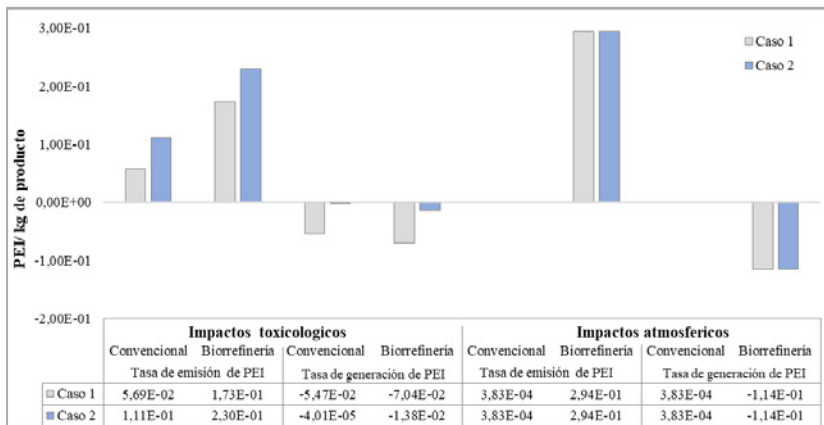
Los PEI de salida para el potencial de calentamiento global (GWP) y el potencial de agotamiento de ozono (ODP) no contribuyen significativamente a la emisión de impactos en comparación con las otras categorías. Se observan tendencias similares en la generación de PEI para estas categorías, así como para el PCOP. Las sustancias químicas manejadas dentro de la topología de biorrefinería de camarón no contribuyen al agotamiento de la capa de ozono, lo que se ve respaldado por las puntuaciones normalizadas nulas para esta categoría. En un trabajo anterior, también se obtuvieron impactos potenciales de salida nulos para el agotamiento del ozono en la producción de microperlas de quitosano a partir de quitosano crudo, lo que indicaba la ausencia de ácidos, gases de efecto invernadero o cualquier producto químico en estado de oxidación elevado que persistiera más tiempo en el ambiente (Moreno-Sader et al., 2020). Las emisiones de dióxido de carbono procedentes de la sección de procesado de camarón son responsables de los resultados para la categoría de potencial de calentamiento global (GWP); sin embargo, el valor alcanzado no es lo suficientemente elevado para afectar al rendimiento del proceso desde el punto de vista ambiental. Además, para la categoría AP se estiman valores de $-1,14E-01$ PEI/kg de producto para los casos 1 y 2; este valor negativo se debe al consumo de HCl durante las neutralizaciones entre etapas.

Figura 4.4. Impactos atmosféricos de la biorrefinería de camarón

Fuente: elaboración propia.

La figura 4.5 muestra los PEI de salida y generados para la topología de biorrefinería de camarón y el procesamiento convencional. Los PEI que salen de la biorrefinería son aproximadamente dos y tres veces más que los emitidos por el sistema convencional para las categorías toxicológicas en los casos 2 y 1, respectivamente. Ambos enfoques reportan valores negativos para la generación de PEI, pero las rutas de conversión en la biorrefinería consumen más PEI que el enfoque convencional. Los impactos atmosféricos de salida alcanzan mayores valores de PEI al ambiente en la topología de biorrefinería con $2,94E-01$ PEI/kg de producto. El enfoque convencional muestra la generación (+) de impactos atmosféricos, mientras que la biorrefinería el consumo (-); el proceso contribuye con la generación de impactos relacionados con el calentamiento global y el cambio climático a través de $1,50E-05$ y $3,68E-04$ PEI/kg de productos en las categorías GWP y AP.

Figura 4.5. Comparación del rendimiento ambiental entre los enfoques convencional y de biorrefinería



Fuente: elaboración propia.

La comparación de estos rendimientos ambientales conduce a una compensación menor de la esperada para la valorización del exoesqueleto del camarón. Aunque esta topología recupera aproximadamente el 25 % del total de residuos potencialmente utilizables, los impactos sobre el ambiente son mayores que los de la producción convencional de carne de camarón debido al uso de agentes químicos como el HCl, el NaOH.

4.4. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten determinar que el aprovechamiento del camarón bajo el concepto de biorrefinería en la región caribe colombiana no es dañino con el ambiente dado que transforma materias primas y residuos de alto potencial de impacto ambiental en productos finales de menor potencial de impacto ambiental. Esto se ve reflejado en los PEI generados que alcanzan

valores negativos en los dos casos estudiados (indicando consumo de PEI). En cuanto a la tasa de salida total de PEI, esta es menor a 1 (4,68E-01 y 5,24 E-01 PEI/kg de productos para los casos 1 y 2, respectivamente), lo que sugiere un buen rendimiento del proceso desde el punto de vista socioambiental. La toxicidad humana por inhalación (HTPI) y la toxicidad terrestre (TTP) alcanzan las estimaciones más altas de producción de PEI para las categorías de impacto toxicológico. Mientras que la categoría de potencial de oxidación fotoquímica representa la mayor contribución a los impactos atmosféricos emitidos. En general, los impactos atmosféricos muestran una mayor emisión de PEI que las categorías toxicológicas, dado a la presencia de componentes orgánicos volátiles que salen del sistema a través de corrientes residuales, como el etanol y la acetona utilizados durante las etapas de despigmentación.

Referencias

- Aparecida, A., Furlan, F., Campos, R. & Alves, E. (2022). Techno-economic-environmental analysis of a microbial oil production integrated into a bioethanol sugarcane biorefinery. *Computer Aided Chemical Engineering*, 51. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95879-0.50052-7>.
- Barlow, J., Sims, R. & Quinn, J. (2016). Techno-economic and life-cycle assessment of an attached growth algal biorefinery. *Bioresource Technology*, 220, 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.091>.
- Der Verband Österreichischer Ziegelwerke. (2016). *GBC Handbook. Minimizing the environmental impact. Emissions into air*. Ziegel.

- Geissler, C., Maravelias, C. (2021). Economic, energetic, and environmental analysis of lignocellulosic biorefineries with carbon capture. *Applied Energy*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117539>.
- Herrera-Aristizábal, R., Salgado-Dueñas, J., Peralta-Ruiz, Y, Leal-Navarro, J. & González-Delgado, Á. (2018). Environmental evaluation of the potential impacts generated by a refinery unit for hydrogen production from natural gas. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 1993–1998. <https://doi.org/10.3303/CET1870333>.
- Hong, S., Yuan, Y., Yang, Q., Zhu, P. & Lian, H. (2018). Versatile acid base sustainable solvent for fast extraction of various molecular weight chitin from lobster shell. *Carbohydrate Polymers*, 201, 211–217. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.08.059>.
- Jaramillo, J. (2011). *Evaluación tecno-económica de la producción de biocombustibles a partir de microalgas* [Tesis de Maestría en Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9747>.
- Koch, D., Paul, M., Beisl, S., Friedl, A. & Mihalyi, B. (2020). Life cycle assessment of a lignin nanoparticle biorefinery: Decision support for its process development. *Journal of Cleaner Production*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118760>.
- Meramo-Hurtado S. & Ojeda-Delgado, K. (2018). Environmental Assessment of a Biorefinery: Case Study of a Purification Stage in Biomass Gasification. *Contemporary Engineering Sciences*, 11(3), 113–120.
- Meramo-Hurtado, S., Alarcón-Suesca, C. & González-Delgado, Á. (2020). Exergetic sensibility analysis and environmental evaluation of chitosan production from shrimp exoskeleton in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119285>.
- Moreno-Sader, K., Meramo-Hurtado, S. & González-Delgado, Á. (2020). Environmental sustainability analysis of chitosan microbeads

- production for pharmaceutical applications via computer-aided simulation, WAR and TRACI as-assessments. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 15, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100212>.
- Niño-Villalobos, A., Puello-Yarce, J., González-Delgado, Á., Ojeda, K. & Sánchez-Tuirán, E. (2020). Biodiesel and Hydrogen Production in a Combined Palm and Jatropha Bio-mass Biorefinery: Simulation, Techno-Economic, and Environmental Evaluation. *ACS Omega*, 5(13), 7074–7084. doi: 10.1021/acsomega.9b03049.
- Pardo-Cárdenas, Y, Herrera-Orozco, I, González-Delgado, Á. & Kafarov, V. (2013). Environmental Assessment of Micro-algae Biosiesel Production in Colombia: Comparison of Three oil Extraction Systems. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 5(2), 85–100.
- Patnaik, P. (2007). *A comprehensive guide to the hazardous properties of chemical substances*. John Wiley.
- Saral, J., Rasheeda, A. & Ranganathan, P. (2022). Economic and environmental analysis of algal biorefinery for the production of renewable fuels and co-product. *Energy Conversion and Management: X*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100189>.
- Sivagnanam, P, Cong, T, Chae, S., Cho, Y. & Park, J. (2018). Deep eutectic solvent-based extraction and fabrication of chi-tin films from crustacean waste. *Carbohydrate Polymers*, 195, 622–630. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.05.018>.
- Xin, Y., Foo, D., Yan, Y., Sharmin, N., Lester, E., Wu, T. & Heng, C. (2021). Analysis of environmental impacts and energy derivation potential of biomass pyrolysis via Piper diagram. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104995>.
- Young, D. & Cabezas, H. (1999). Designing sustainable processes with simulation: The waste reduction (WAR) algo-rithm. *Computers & Chemical Engineering*, 23(10), 1477–1491. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(99\)00306-3](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(99)00306-3).



Capítulo V.

**Evaluación exergética
asistida por computador de
una biorrefinería de camarón**

El aspecto energético es uno de los más importantes en bioprocesos y biorrefinerías cuando los biocombustibles hacen parte de la paleta de productos a obtener, ya que lo mínimo que se espera en estos bioprocesos es tener un balance de energía positivo, es decir, que el biocombustible al ser utilizado produzca más energía que la que se tuvo que suministrar para producirlo, transportarlo y distribuirlo. En caso de que dentro de la paleta de productos a obtener en la biorrefinería no se encuentren biocombustibles, el criterio energético sigue siendo fundamental para evaluar la sostenibilidad del proceso. Conforme a uno de los 12 principios de la química verde sostenible, se deben diseñar procesos que ahorren energía, tratando de reducir al mínimo la energía necesaria para producir una reacción química, una separación o un calentamiento o enfriamiento, lo cual contribuye a disminuir los impactos ambientales y económicos de los procesos. Dentro de los métodos desarrollados para evaluar el desempeño energético de procesos, bioprocesos y biorrefinerías se destacan el análisis energético, el análisis exergético y el análisis emergético.

La exergía se define como la máxima cantidad de trabajo que se puede obtener de un sistema cuando un flujo de energía es llevado

de su estado inicial (presión, temperatura y potencial químico de las sustancias que hacen parte del sistema) a un estado de equilibrio termodinámico con las sustancias comunes del entorno natural (presión, temperatura y potencial químico de las sustancias en el estado de referencia), por medio de procesos reversibles (Pérez-Zúñiga et al., 2016). En otras palabras, la exergía es la máxima cantidad de trabajo obtenible de la interacción entre un determinado sistema termodinámico y el ambiente de referencia, la exergía permite medir la degradación de la energía en los procesos. Si el estado de una cantidad de materia es diferente al del ambiente, existirá la posibilidad de producir trabajo, esto es, porque cuando alguna propiedad intensiva de un sistema (presión, temperatura, o potencial químico de una sustancia) difiere de la correspondiente a su entorno natural, existe la posibilidad de realizar trabajo (Casisi et al., 2022).

En procesos industriales, la exergía se destruye por las irreversibilidades termodinámicas derivadas de la segunda ley de la termodinámica. Un análisis exergético permite identificar, localizar y cuantificar las principales causas de irreversibilidades termodinámicas de un sistema o proceso, proporciona información para mejorar y diagnosticar sistemas o procesos que consumen mucha energía; por lo tanto, se convierte en una herramienta importante para determinar potenciales puntos de mejora de un proceso incluyendo la reducción del consumo de recursos renovables y no renovables. El análisis exergético permite obtener toda la información necesaria para mejorar termodinámicamente un sistema, contribuyendo decisivamente en la eficiencia, integración y optimización bajo el criterio energético de las unidades del proceso entre sí. Las etapas de proceso que poseen alta destrucción de exergía (o irreversibilidades) revelan la oportunidad de trabajo perdido o el potencial de trabajo que se ha desperdiciado. Para el análisis exergético se requiere definir un ambiente de referencia;

este ambiente estándar es un estado de equilibrio termodinámico completo, que proporciona un nivel de referencia natural para la determinación de la exergía como una propiedad de los sistemas (Meramo et al., 2021).

La ventaja más significativa de un análisis exergetico es la posibilidad de determinar la eficiencia termodinámica de una unidad del sistema, que permite identificar las etapas con mayores sumideros de energía a fin de implementar mejoras para lograr un mayor rendimiento termodinámico. Este es capaz de guiar el diseño del proceso hacia mejores unidades de procesamiento y permite tomar decisiones sobre nuevas tecnologías a utilizar conduciendo a una mejor economía y menor impacto ambiental. Por otra parte, una de las desventajas del análisis exergetico es la falta de información sobre cómo evitar las ineficiencias. Cuando se dan alternativas para el mejoramiento de las ineficiencias del proceso, estas no aseguran tener el mismo impacto ambiental, por ende, existe la posibilidad que estas alternativas tengan implicaciones indeseables sobre el ambiente.

5.1. Evaluación exergetica de procesos

La realización del análisis exergetico involucra la primera y segunda ley de la termodinámica (Casasi et al., 2022), rigiéndose por las ecuaciones 5.1–5.16. El balance de exergía está dado por la ecuación 5.1, donde las pérdidas de exergía se definen como la diferencia entre la exergía total de entrada y la exergía total de salida (tanto la de los productos como la de los residuos); estas pérdidas de exergía son inevitables por la simple existencia de la segunda ley de la termodinámica (Arteaga et al., 2018).

$$\text{Pérdidas}_{\text{EX}} = \text{EX}_{\text{total-entrada}} - \text{EX}_{\text{total-salida}} \quad (5.1)$$

Las entradas totales de exergía a un sistema están asociadas a todos los flujos másicos que entran al sistema, es decir, las corrientes de proceso, y a todos los servicios industriales que requiere el sistema (trabajo mecánico, calentamiento, enfriamiento, etc.) (Arteaga et al., 2018). La exergía total de entrada al sistema viene dada por la ecuación 5.2. Por otro lado, la exergía que sale de un sistema se define por la ecuación 5.3 y se debe a las corrientes de productos y residuos que dejan el sistema.

$$Ex_{\text{total-entrada}} = \sum Ex_{\text{masa-entrada}} + \sum Ex_{\text{servicios-entrada}} \quad (5.2)$$

$$Ex_{\text{total-salida}} = \sum Ex_{\text{productos}} + \sum Ex_{\text{residuos}} \quad (5.3)$$

La exergía relacionada al flujo de masa en ausencia de efectos eléctricos, magnéticos, nucleares y de tensión superficial se calcula con la ecuación 5.4. En la mayoría de los procesos, la exergía cinética (Ex_{cinetica}) y la exergía potencial ($Ex_{\text{potencial}}$) tienden a ser despreciadas por su baja contribución a la exergía total en comparación con las contribuciones que hacen las exergías físicas y químicas. La exergía física (Ex_{fisica}) se define por la ecuación 5.5 relacionando la temperatura del ambiente de referencia (T_o), la entalpía de la mezcla (\dot{H}) y entropía de la mezcla (\dot{S}) a las condiciones a las cuales se encuentra la corriente de proceso a analizar, con la entalpía (\dot{H}_o) y entropía (\dot{S}_o) de la mezcla si estuviesen a las condiciones del ambiente de referencia. Por otra parte, la exergía química (Ex_{quimica}) se calcula como se muestra en la ecuación 5.6, donde ($Ex_{\text{ch},i}^o$) es la exergía química del componente i en la mezcla, y_i es la fracción molar o másica según corresponda del componente i y R es la constante universal de los gases en las unidades apropiadas. La exergía química de cada componente se calcula con la ecuación 5.7, donde n_j es el número de átomos del elemento j en el componente i , ($Ex_{\text{ch},i}^o$) es la exergía química estándar del elemento j y $\Delta G_{f,i}^o$ es la energía libre de Gibbs

estándar de formación del componente i . Las exergías químicas de los elementos están reportadas en la literatura (Arteaga et al., 2018).

$$Ex_{masa} = Ex_{física} + Ex_{química} + Ex_{potencial} + Ex_{cinética} \quad (5.4)$$

$$Ex_{física} = (\dot{H} - \dot{H}_0) + T_0(\dot{S} - \dot{S}_0) \quad (5.5)$$

$$Ex_{química-mezcla} = \sum_i y_i Ex_{ch,i}^0 + RT_0 \sum_i y_i \ln(y_i) \quad (5.6)$$

$$Ex_{ch,i}^0 = \Delta G_f^0 + \sum_j n_j Ex_{ch,j}^0 \quad (5.7)$$

Cuando la corriente a analizar se comporta como gas ideal con una capacidad calorífica (C_p) constante, la exergía física de la mezcla se calcula como muestra la ecuación 5.8; si la corriente se encuentra en estado sólido o líquido y posee una capacidad calorífica (C_p) constante, la exergía física sigue la expresión de la ecuación 5.9.

$$Ex_{física} = C_p(T - T_0) - T_0 \left(C_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{P}{P_0} \right) \quad (5.8)$$

$$Ex_{física} = C_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] - V_m(P - P_0) \quad (5.9)$$

La exergía química de cualquier combustible de origen fósil (carbón, petróleo, gas natural) se puede calcular multiplicando el poder calorífico neto o entalpía (LHV) por un coeficiente apropiado (β), como indica la ecuación 5.10.

$$Ex_{química-combustibles} = \beta(LHV) \quad (5.10)$$

La exergía de servicios industriales se define por la ecuación 5.11, como la suma de la exergía por trabajo ($Ex_{trabajo}$) y la exergía por calor (Ex_{calor}).

$$Ex_{\text{Servicios}} = Ex_{\text{trabajo}} + Ex_{\text{calor}} \quad (5.11)$$

Las expresiones para calcular la exergía por trabajo y la exergía por calor se presentan en las ecuaciones 5.12 y 5.13. La exergía asociada al trabajo en un sistema donde no existe cambio de volumen es igual al trabajo propio del sistema (W). La exergía por calor involucra la eficiencia de Carnot que representa la fracción de la energía transferida de una fuente de calor a temperatura T que puede convertirse en trabajo en un ambiente a la temperatura de referencia T_0 (Arteaga et al., 2018).

$$Ex_{\text{trabajo}} = W \quad (5.12)$$

$$Ex_{\text{calor}} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) Q_i \quad (5.13)$$

La exergía total destruida incluye las pérdidas de exergía inevitables (las que vienen dadas por la ecuación 5.1) y las pérdidas de exergía que son evitables (la exergía que se pierde con los residuos, que se podrían evitar si estos se transformaran en productos). Esta corresponde a las irreversibilidades totales del sistema, es decir, todo el potencial para producir trabajo que no fue aprovechado. Se calcula como indica la ecuación 5.14, restando las entradas totales de exergía al proceso y la exergía asociada a la corriente de productos (potencial de trabajo aprovechado). Como se mencionó anteriormente, las irreversibilidades asociadas con la exergía de los residuos se pueden evitar, aprovechando dicho residuo como un producto o subproducto adicional del proceso. Las pérdidas de exergía se definen también como las irreversibilidades no evitables, pues corresponden a aquellas irreversibilidades derivadas del aumento de entropía de los sistemas termodinámicos (Arteaga et al., 2018).

$$EX_{\text{destruida}} = EX_{\text{total-entrada}} - \sum EX_{\text{productos}} \quad (5.14)$$

Para calcular la eficiencia exergetica de un proceso se tiene en cuenta la destrucción total de exergetica y las entradas totales de exergetica al sistema como se muestra en la ecuación 5.15; el porcentaje de exergetica destruida en una etapa i del proceso, se puede calcular como se indica en la ecuación 5.16.

$$\eta_{\text{exergetica}} = 1 - \left(\frac{EX_{\text{destruida}}}{EX_{\text{total-entrada}}} \right) \quad (5.15)$$

$$\%EX_{\text{destruida},i} = \left(\frac{EX_{\text{destruida},i}}{EX_{\text{total-entrada}}} \right) * 100\% \quad (5.16)$$

5.2. Investigaciones recientes de evaluaciones exergeticas de bioprocesos y biorrefinerías

El enfoque de la exergetica se ha utilizado ampliamente para analizar y mejorar los procesos, ya que permite identificar la degradación de la energía mediante la medición de las pérdidas e irreversibilidades (Meramo-Hurtado et al., 2019). La eficiencia exergetica podría ser un indicador más importante que la eficiencia energética, ya que informa sobre la calidad de la energía utilizada en el sistema (Dincer & Abu-Rayash, 2020).

Trabajos recientes han abordado el rendimiento exergetico de diferentes tipos de biorrefinerías; por ejemplo, Ofori-Boateng & Lee (2014) evaluaron la sostenibilidad de una biorrefinería basada en aceite de palma para producir etanol celulósico y fitoquímicos utilizando la evaluación exergetica del ciclo de vida. Los autores obtuvieron una eficiencia exergetica e índice de sostenibilidad termodinámica (IST) del 59,05 % y 2,44 respectivamente; este

enfoque identificó las principales áreas en las que se necesitan mejoras para la producción sostenible de biocombustibles y productos bioquímicos a partir de esta materia prima. También se estudió una biorrefinería lignocelulósica acoplada a un molino de caña de azúcar mediante un análisis de exergía que mostró una eficiencia del 44,73 % y pérdidas de exergía en el generador de vapor (Aghbashlo et al., 2018). Arteaga et al. (2018) evaluaron una biorrefinería a base de palma africana para la producción de 5,07 t/h aceite de palma, 0,51 t/h aceite de palmiste y 6,82t/h hidrógeno. Se obtuvo una eficiencia exergética global para el sistema del 38 %, donde la separación de hidrógeno es la etapa más crítica con una eficiencia de 0,0078 %. Por su parte, Meramo-Hurtado et al. (2020) estudiaron la producción lineal de quitosano a partir del exoesqueleto de camarón, la cual reportó una eficiencia exergética global del 4,58 %. Las mayores irreversibilidades se encontraron en la etapa de despigmentación, lo que permite concluir que las mejoras de diseño pueden aumentar hasta un 58,93 % la eficiencia global. Por otro lado, Ocampo et al., (2022) evaluaron energética, exergética, económica y ambientalmente una biorrefinería que integra palma de aceite y caña de azúcar, la planta tuvo una eficiencia exergética global de 62,7 %. Khounani et al. (2021) realizaron un análisis exergético para una biorrefinería de cártamo de cultivo integral como una forma de reducir los desechos agrícolas de manera sostenible, además de identificar las mayores pérdidas de exergía y realizar mejoras en el proceso, las mayores ineficiencias se evidencian en las unidades de pretratamiento de biomasa y producción de bioetanol con 12,4 % y 10,3 %, respectivamente; el proceso tuvo una eficiencia exergética global de 72,7 %. Por su parte, Wan et al. (2022) desarrollaron el análisis exergético para una biorrefinería de ácido láctico y electricidad a partir de residuos de *Eucheuma denticulatum* (residuos celulósicos de macroalgas) para el cual se obtuvo una destrucción de exergía normalizada de 0,73.

5.3. Resultados

El análisis exergético por etapa para la biorrefinería de camarón en la región Caribe colombiana se realiza para las unidades de procesamiento definidas en el capítulo 2 y presentadas en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Nomenclatura de las etapas de la biorrefinería de camarón

Sección	Etapas N°	Nombre de la etapa
i) Procesamiento de camarones	1	Lavado 1
	2	Clasificación
	3	Descabezado
	4	Pelado
ii) Recuperación de quitina	5	Pretratamiento exoesqueleto
	6	Despigmentación 1
	7	Desmineralización
	8	Desproteínización
	9	Purificación de quitina
iii) Producción de quitosano	10	Desacetilación
	11	Purificación de quitosano
iv) Recuperación de astaxantina	12	Despigmentación 2
	13	Purificación de astaxantina

Fuente: elaboración propia.

Las exergías químicas de las corrientes de proceso se estiman a través de las exergías químicas de los componentes a condiciones estándares de presión y temperatura consultadas en la literatura. En caso de que la exergía química no esté disponible en la literatura, se calcula a través de las exergías estándares de los átomos que constituyen estas moléculas; los valores obtenidos se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Exergía química estándar componentes
de la topología de biorrefinería de camarón

Componentes	Exergía Química (kJ/kg)
L-Alanina	42058,82
Ácido L-Glutámico	16270,65
L-fenilalanina	28960,47
Metionina	26547,68
Lisina	28174,91
CaCO ₃	162,85
Ca ₃ (PO ₄) ₂	120,25
Na ₂ CO ₃	387,77
MgCO ₃	353,42
D-N-acetilglucosamina	22896,89
Metil-palmitato	39806,40
Astaxantina	36683,82
Agua	50,00
CO ₂	442,63
Cloruro de magnesio	1661,42
Cloruro de calcio	946,03
Cloruro de hidrógeno	2317,61
Ácido ortofosfórico	914,29
Etanol	27152,16
NaOH	1872,50
NaCl	244,70
Quitosano	38666,46
Acetato de sodio	134,94
MBS	13909,86
Hipoclorito de sodio	2286,00
Acetona	30945,25

Fuente: elaboración propia.

Las exergías físicas de las corrientes que hacen parte de la biorrefinería de camarón se obtuvieron de la simulación de la topología mostrada en el capítulo 2. La tabla 5.3 presentan las exergías físicas de las principales corrientes.

Tabla 5.3. Exergía física de las principales corrientes de la topología de biorrefinería de camarón

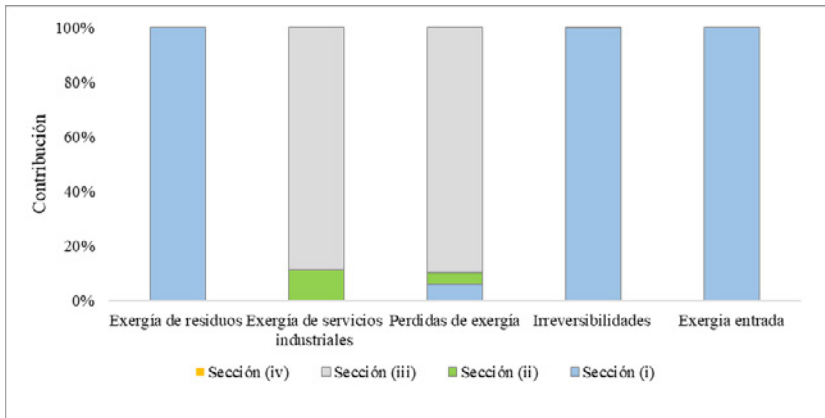
Corrientes	Exergía física (MJ/h)	Corrientes	Exergía física (MJ/h)
FCAMARÓN	5,35E+13	RAGUA5	4,23E-11
RCAMARÓN	6,58E+11	QUITINA2	2,97E-14
CABEZAS	3,91E+13	QUITINA	3,91E-02
CAPARAZÓN	1,37E+13	RAGUA6	1,25E-02
CARNE	1,12E+04	RAGUA7	3,32E-04
RAGUA1	0,00E+00	QUITOSANO	3,34E+00
RAGUA2	1,22E-08	R-ETAN1	0,00E+00
PIG-ETAN	4,91E+01	R-ETAN2	0,00E+00
CRSHDRY	0,00E+00	RAGUA8	0,00E+00
RNAOH	9,23E+08	ASTAXANT	0,00E+00

Fuente: elaboración propia.

La figura 5.1 muestra las contribuciones de cada sección de la biorrefinería sobre los parámetros exergéticos (irreversibilidades, exergía de entrada, pérdidas de exergía, exergía de residuos y exergía de servicios industriales). Los resultados permiten identificar las unidades más críticas de la topología de biorrefinería de camarón. Las etapas de descabezado y clasificación son las de mayores irreversibilidades y representan una contribución de 99,97 % a la exergía total destruida. Estos resultados se deben a la exergía química de los componentes de alto peso molecular de las cabezas y camarones manchados/rotos. Además, las etapas de la sección (i) operan a 9°C (lejos del estado de referencia) para preservar la calidad de la carne, lo que conduce a que las corrientes de esta sección presenten una alta exergía física. Lo anterior también se aplica a los parámetros de exergía de entrada y exergía de residuos, donde la sección de procesamiento de camarones contribuye con aproximadamente un 99,9 %. Las alternativas de valorización de estos residuos abarcan la producción de aceite de camarón rico en

ácidos grasos ω -3 (Scurria et al., 2020) y de harina de camarón, que pueden servir para reducir la generación de bio-residuos y, en consecuencia, la exergía total de los residuos.

Figura 5.1. Contribución de las secciones del proceso a los parámetros exergéticos



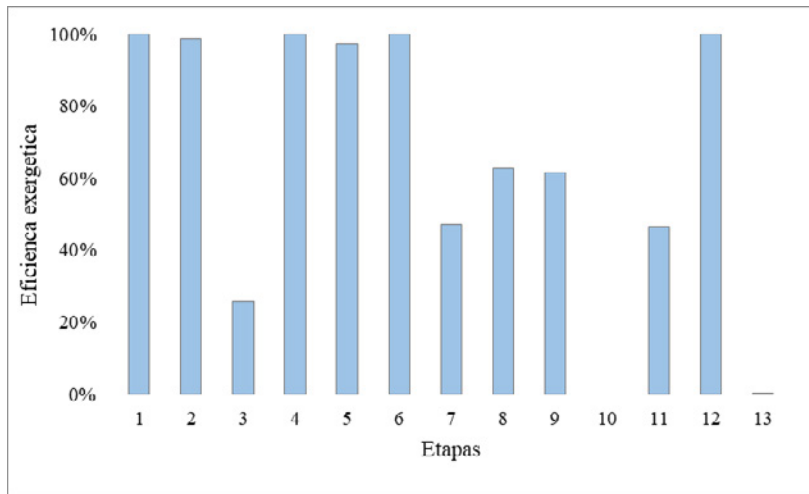
Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, la sección de producción de quitosano representa el 89,8 % y el 88,8 % de las pérdidas totales de exergía y la exergía de servicios industriales, respectivamente, mientras que representa el 0,03 % de las irreversibilidades totales. Esto se explica por la elevada demanda energética para convertir la quitina en quitosano a una temperatura entre 100 y 110°C. La incorporación de enfoques de integración energética es clave para reducir dichas irreversibilidades aprovechando las corrientes con alto potencial energético. Por su parte, la sección de recuperación de quitina muestra una contribución del 11,25 % y 4,27 % sobre la exergía de servicios industriales y pérdidas de exergía. La presencia de múltiples etapas de secado dentro del procesamiento del caparazón aumenta el consumo energético de esta sección, lo que justifica el

mayor requerimiento de servicios industriales en comparación con la sección (iv).

Como se muestra en la figura 5.2, las eficiencias exérgicas más bajas se identifican en las etapas de desacetilación (etapa 10) y purificación de astaxantina (etapa 13), seguidas de la etapa de descabezado (etapa 3) con una eficiencia de alrededor del 26 %. Estas unidades muestran una pequeña cantidad de exérgia de productos y una alta exérgia de entrada, teniendo en cuenta el flujo de masa y servicios industriales. Por su parte, las etapas de lavado del camarón fresco, pelado y despigmentación 1 y 2 alcanzan las mayores eficiencias exérgicas dentro del proceso. En la sección (ii) se registran dos etapas con eficiencias exérgicas del 100 %, mientras que tres etapas alcanzan valores entre 47 % y 63 %. La sección (i) no tiene etapas con eficiencias nulas, mientras que las etapas de las secciones (iii) y (iv) muestran eficiencias del 0 %. Comparando estos resultados con la eficiencia por etapas de otros procesos similares, la biorrefinería de camarón muestra un mayor número de etapas con bajo rendimiento exérgico. Por ejemplo, Moreno et al. (2019) realizaron un análisis exérgico de dos sistemas de producción de bio-oil alcanzando eficiencias exérgicas por encima del 70 % para la mayoría de las unidades. Leal et al. (2017) evaluaron una unidad de tratamiento de aminos mostrando eficiencias exérgicas por encima del 90 %, excepto por el circuito superior con una eficiencia exérgica de 4,1 %. Jia et al. (2017) reportaron eficiencias exérgicas que oscilan entre 57,57 % y 99,81 % para unidades en la producción de biodiésel a partir de paja de cebada.

Figura 5.2. Eficiencia exergetica de la biorrefinería de camarón por etapas



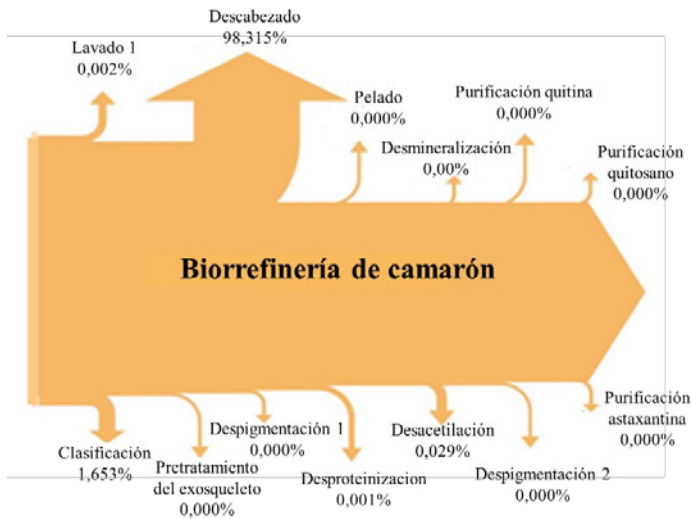
1. Lavado de camarones frescos, 2. Clasificación, 3. Descabezado, 4. Pelado, 5. Pretratamiento del exoesqueleto de camarón, 6. Despigmentación 1, 7. Desmineralización, 8. Desproteinización, 9. Purificación de quitina, 10. Desacetilación, 11. Purificación de quitosano, 12. Despigmentación 2, 13. Purificación de astaxantina

Fuente: elaboración propia.

La figura 5.3 muestra el aporte de cada etapa de la biorrefinería de camarón sobre el total de exergía destruida. La etapa de descabezado representa el 98,325 % de las irreversibilidades totales, seguida de la etapa de clasificación con un 1,653 %, lo que confirma los resultados del análisis de exergía por sección. La etapa de desacetilación tiene una contribución del 0,029 %, mientras que el lavado de los camarones frescos del 0,002 %. Para reducir estas irreversibilidades, se recomienda principalmente el uso de las cabezas de camarón para su posterior procesamiento en la biorrefinería como fuente de co-productos potenciales. Las etapas con una contribución mínima son el pelado ($2,23E-10$ %), el pretratamiento del exoesqueleto de camarón ($7,69E-11$ %), la despigmentación 1 ($5,38E-12$ %), la despigmentación 2 ($9,43E-12$ %), y la purificación

del quitosano ($3,12E-10$ %). El hecho de que el exoesqueleto del camarón se emplee para la producción de quitina, quitosano y astaxantina explica la menor irreversibilidad de la etapa de pelado en comparación con el descabezado o la clasificación, donde se manipula el mismo biomaterial.

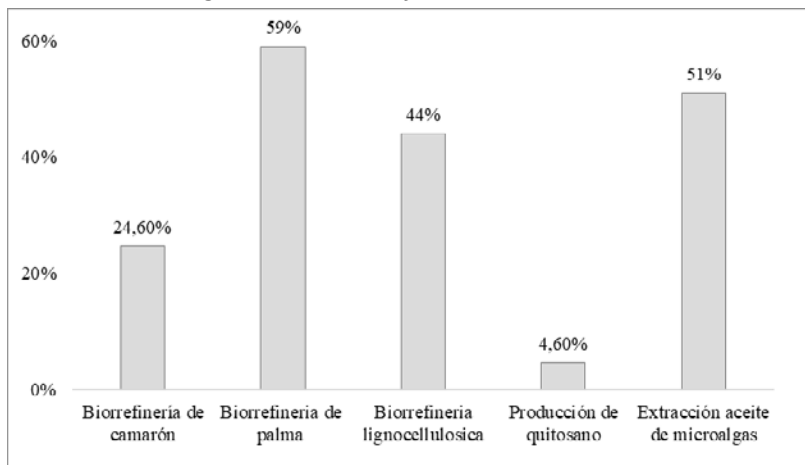
Figura 5.3. Diagrama Sankey de irreversibilidades para la biorrefinería de camarón



Fuente: elaboración propia.

La figura 5.4 muestra una comparación entre la eficiencia exérgica global de la biorrefinería de camarón y otros procesos.

Figura 5.4. Comparación de la eficiencia exergética global de la biorrefinería de camarón



Fuente: elaboración propia.

La producción lineal de 12.152 t/año de quitosano a partir de exoesqueleto de camarón reportada por Meramo-Hurtado et al. (2020) alcanzó una eficiencia del 4,6 %, significativamente menor que la eficiencia obtenida para la biorrefinería de camarón, que es del 24,6 %. A pesar de que este enfoque de biorrefinería muestra una mejor eficiencia exergética global con relación al proceso anterior, su rendimiento es más bajo comparado con la eficiencia de una biorrefinería a base de palma (Ofori-Boateng & Lee, 2014), una biorrefinería de múltiples materias primas lignocelulósicas (Sánchez-Tuiran et al., 2020) y un proceso de extracción de aceite de microalgas (Peralta-Ruiz et al., 2013), siendo estas de 59 %, 44 % y 51 %, respectivamente. Ayala et al. (2022) evaluaron exergéticamente una biorrefinería de banano para la producción de biocombustibles mediante pirólisis, en este análisis obtuvieron una eficiencia exergética global de 61,76 %, así mismo, identificaron

que las etapas de secado y pirolisis son las que más contribuyen a la exergía destruida.

5.4. Conclusiones

Los resultados del análisis exergético para la topología de biorrefinería de camarón muestran que las etapas con mayores irreversibilidades dentro del proceso son el descabezado y la clasificación con contribuciones del 98,315 % y 1,653 % del total de la exergía destruida, respectivamente. Las irreversibilidades en estas etapas se deben a la exergía por residuos. Las mayores pérdidas de exergía se encuentran en las etapas de desacetilación, lavado de camarones frescos y desproteínización. La eficiencia exergética global se cuantifica en un 25,61 %, lo que aumenta significativamente la eficiencia exergética de la cadena de producción lineal de quitosano a partir del exoesqueleto que se encuentra en un 4,58 %.

Referencias

- Aghbashlo, M., Mandegari, M., Tabatabaei, M., Farzad, S., Mojarab, M. & Johann, F. (2018). Exergy analysis of a lignocellulosic-based biorefinery annexed to a sugarcane mill for simultaneous lactic acid and electricity production. *Energy*, 149, 623–638. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.063>.
- Arteaga, S., González, K., Ojeda, Pájaro, M. & González, A. (2018). Computer-Aided Exergy Analysis of a Palm Based-Biorefinery for Producing Palm Oil, Kernel Oil and Hydrogen. *Contemporary Engineering Sciences*, 11(11), 537–545.

- Ayala, N., Malagón, D. & Milquez, H. (2022). Exergoeconomic evaluation of a banana waste pyrolysis plant for biofuel production. *Journal of Cleaner Production*, 359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132108>.
- Casisi, M., Khedr, S. & Reini, M. (2022). The Thermo-economic Environment and the exergy-based cost accounting of technological and biological systems. *Energy*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125117>.
- Dincer, I. & Abu-Rayash, A. (2020). Chapter 6 - Sustainability modeling. In *Energy Sustainability* (pp. 119–164). Academic Press.
- Jia, Z., Chi, R., Sun, L. & Tan, H. (2017). Biodiesel processes energy improvement based on Pinch and exergy Analysis. *Chemical Engineering Transactions*, 61, 487–492. <https://doi.org/10.3303/CET1761079>.
- Khounani, Z., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Nazemi, F., Shaeifi, M., Karimi, K., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M. & Shiung Lam, S. (2021). Exergy analysis of a whole-crop safflower biorefinery: A step towards reducing agricultural wastes in a sustainable manner. *Journal of Environmental Management*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111822>.
- Leal, J., González-Delgado, Á. & Peralta-Ruiz, Y. (2017). Environmental Assessment of HF Alkylation Process Using WAR Algorithm. *Contemporary Engineering Sciences*, 10(13), 641–649.
- Meramo, S., Gonzalez, A., Rehmann, L., Quiñones, E. & Mehvar, M. (2021). Comparative analysis of biorefinery designs based on acetone-butanol-ethanol fermentation under exergetic, techno-economic, and sensitivity analyses towards a sustainability perspective. *Journal of Cleaner Production*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126761>.
- Meramo-Hurtado, S., Alarcón-Suesca, C. & González-Delgado, Á. (2020). Exergetic sensibility analysis and environmental evaluation of chitosan production from shrimp exoskeleton in Colombia.

- Journal of Cleaner Production*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119285>.
- Meramo-Hurtado, S., Herrera-Barros, A. & González-Delgado, Á. (2019). Evaluation of large-scale production of chitosan microbeads modified with nanoparticles based on exergy analysis. *Energies*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/en12071200>.
- Moreno-Sader, K., Meramo-Hurtado, S. & González-Delgado, Á. (2019). Computer-aided environmental and exergy analysis as decision-making tools for selecting bio-oil feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.044>.
- Ocampo, E., Aparecido, A., Castillo, Y., Escobar, J., Da costa, E., Horta, L., Xavier, M. & Martínez, A. (2022). Brazilian integrated oilpalm-sugarcane biorefinery: An energetic, exergetic, economic, and environmental (4E) assessment. *Energy Conversion and Management*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116066>.
- Ofori-Boateng, C. & Lee, K. (2014). An oil palm-based biorefinery concept for cellulosic ethanol and phytochemicals production: Sustainability evaluation using exergetic life cycle assessment. *Applied Thermal Engineering*, 62(1), 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.022>.
- Peralta-Ruiz, Y., González-Delgado, Á. & Kafarov, V. (2013). Evaluation of alternatives for microalgae oil extraction based on exergy analysis. *Applied Energy*, 101, 226–236. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.065>.
- Pérez-Zúñiga, D., Luna-Barrios, E., Peralta-Ruiz, Y. & González-Delgado, A. (2016). Techno-economic sensitivity of bio-hydrogen production from empty palm fruit bunches under colombian conditions. *Chemical Engineering Transactions*, 52, 1117–1122. doi: 10.3303/CET1652187.

- Sánchez-Tuiran, E., Meramo-Hurtado, S., Ponce-Ortega, J., El-Halwagi, M. & Ojeda-Delgado, K. (2020). Synthesis and Sustainability Evaluation of a Lignocellulosic Multifeedstock Biorefinery Considering Technical Performance Indicators. *ACS Omega*, 5, 9259–9275. doi: 10.1021/acsomega.0c00114.
- Scurria, A., Fabiano, A., Lino, C., Pagliaro, M., D'Agostino, F., Avellone, G., Chemat, F. & Ciriminna, R. (2020). High Yields of Shrimp Oil Rich in Omega-3 and Carotenoids: Extending to Shrimp Waste the Circular Economy Approach to Fish Oil Extraction. *ACS Omega*, 5, 17500–17505. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01978>
- Wan, M., Shi, I., Yew, H. & Kee, M. (2022). Exergy analysis of a biorefinery process for co-production of third-generation L-lactic acid and electricity from *Eucheuma denticulatum* residues. *Energy*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122968>.



Capítulo VI.

**Análisis de seguridad
inherente de una
biorrefinería de camarón**

La seguridad es un factor importante en el diseño de procesos químicos, bioprocesos y biorrefinerías. Esto se debe a requisitos legales generales, a la imagen de la empresa y a razones económicas (Heikkilä, 1999), pues una planta insegura no es económicamente viable, si bien, se pueden ahorrar algunos recursos al no invertir en elementos que garanticen la seguridad del proceso, los gastos derivados de la ocurrencia de incidentes o accidentes superarán en varios ordenes de magnitud dichos ahorros. La seguridad de un proceso puede lograrse por medios internos (inherentes) y externos. Diferentes metodologías de evaluación de seguridad de procesos en diferentes etapas de diseño o ya en operación han sido desarrolladas para identificar y evaluar los riesgos y así aplicar medidas para su mitigación o eliminación (Li et al., 2011). Entre los métodos más representativas se tiene el índice de incendio y explosión de Dow (F&E), el índice prototipo de seguridad inherente (PIIS), el índice de seguridad inherente (ISI), el índice de seguridad inherente integrado (I2SI) y el análisis HAZOP (del inglés Hazard and Operability que significa "riesgos y operabilidad").

6.1. Índice de seguridad inherente (ISI)

El índice de seguridad inherente (ISI) propuesto por Heikkilä, es una herramienta para determinar la seguridad inherente de un proceso. Se destaca por requerir poca información para su cálculo en comparación con otros métodos de análisis de seguridad, lo que lo hace adecuado para ser aplicado en las etapas preliminares del diseño del proceso (Abedi & Shahriari, 2005). La seguridad inherente está relacionada con las propiedades intrínsecas del proceso; productos químicos y operaciones más seguras (Heikkilä, 1999). Además, se fundamenta en evitar y eliminar los riesgos en lugar de controlarlos mediante sistemas de protección.

El índice de seguridad inherente total (I_{TI}) se calcula como la suma del índice de seguridad inherente química (I_{CI}) y el índice de seguridad inherente de proceso (I_{PI}) (Heikkilä, 1999) como se muestra en la ecuación 6.1. Estos índices se calculan para cada alternativa de proceso por separado y los resultados se pueden comparar entre sí.

$$I_{TI} = I_{CI} + I_{PI} \quad (6.1)$$

El índice de seguridad inherente química (ecuación 6.2) contiene factores químicos que afectan la seguridad inherente de los procesos. Estos factores incluyen la reactividad química, la inflamabilidad, la explosividad, la toxicidad y la corrosión de las sustancias químicas presentes en el proceso. La inflamabilidad, la explosividad y la toxicidad se determinan por separado para cada sustancia del proceso. La reactividad química consiste en los valores máximos de los índices de los calores de reacción principal y secundaria, y el valor máximo de interacción química que describe las reacciones no deseadas entre las sustancias químicas presentes en el área de proceso estudiado.

$$I_{CI} = I_{RM,max} + I_{RS,max} + I_{INT,max} + (I_{FL} + I_{EX} + I_{TOX})_{max} + I_{COR,max} \quad (6.2)$$

Donde $I_{rm,max}$ es el índice de reacción química principal, $I_{rs,max}$ es el índice de reacción química secundaria, $I_{int,max}$ es el índice de interacción química, $(I_{fl} + I_{ex} + I_{tox})_{max}$ es el índice de sustancia peligrosa y $I_{cor,max}$ es el subíndice de corrosividad.

El índice de seguridad inherente de proceso (ecuación 6.3) expresa la seguridad inherente al procesamiento de la materia prima en sí. Incluye subíndices de inventario (I_I), temperatura ($I_{T,max}$) y presión ($I_{p,max}$) del proceso, seguridad de los equipos ($I_{EQ,max}$) y estructura segura del proceso ($I_{ST,max}$) (Heikkilä, 1999).

$$I_{PS} = I_I + I_{T,max} + I_{p,max} + I_{EQ,max} + I_{ST,max} \quad (6.3)$$

Los cálculos del índice de seguridad inherente (ISI) se realizan sobre la base de la peor situación. El planteamiento del peor caso describe la situación más arriesgada que puede aparecer. Un valor bajo del índice representa un proceso intrínsecamente más seguro. En los cálculos se utiliza la mayor suma de los subíndices de inflamabilidad, explosividad y exposición tóxica. Para el inventario, la temperatura y presión del proceso, se utilizan los valores máximos previstos. La peor interacción posible entre sustancias químicas o equipos y la peor estructura de proceso dan los valores de estos subíndices.

La forma de utilizar el índice es flexible. Las comparaciones pueden hacerse a nivel de proceso, subproceso, o considerando solo una parte de los factores (por ejemplo, solo factores orientados al proceso). Se pueden comparar diferentes alternativas de proceso entre sí sobre la base del ISI. También pueden compararse los diseños de las secciones del proceso en términos de sus índices con el fin de encontrar el punto más vulnerable en el diseño. Debido a su flexibilidad, el índice total de seguridad inherente se integra

con bastante facilidad en las herramientas de simulación y optimización (Heikkilä, 1999).

Los proyectos de diseño de procesos son únicos, por lo tanto, la cantidad y el tipo de alternativas del proceso varían. Además, los diseñadores de procesos pueden hacer hincapié en los factores de seguridad de forma diferente según la política de la empresa y el problema en cuestión. Por lo tanto, los subíndices del ISI pueden ponderarse para adaptarse a las nuevas situaciones. Esto puede hacerse introduciendo factores de ponderación en las ecuaciones 6.1-6.3. En la tabla 6.1 se presenta la puntuación que puede alcanzar cada subíndice. Un rango más amplio significa un mayor impacto en la seguridad de la planta.

Tabla 6.1. *Subíndices de seguridad inherente*

I_{CI}	Símbolo	Puntuación
Calor de reacción principal	I_{RM}	0-4
Calor de reacción secundaria	I_{RS}	0-4
Interacción química	I_{INT}	0-4
Inflamabilidad	I_{FL}	0-4
Explosividad	I_{EX}	0-4
Exposición tóxica	I_{TOX}	0-6
Corrosividad	I_{COR}	0-2
I_{PI}	Símbolo	Puntuación
Inventario	I_I	0-5
Temperatura de proceso	I_T	0-4
Presión de proceso	I_P	0-4
Seguridad de equipos	I_{EQ}	
Área de límites de la batería interna	ISBL	0-4
Área de límites de la batería externa	OSBL	0-3
Estructura segura de proceso	I_{ST}	0-5

Fuente: elaboración propia.

6.1.1. Índice de seguridad inherente química

Este índice de seguridad inherente química se ocupa de los peligros relacionados con las propiedades químicas de las sustancias en el proceso. El índice se divide en subíndices para los peligros de reacción y de sustancias peligrosas.

6.1.1.1. Subíndices de riesgos de reacción

El índice de seguridad inherente (ISI) se ocupa tanto de las reacciones principales como de las reacciones secundarias que tienen lugar en el reactor y que son significativas. También se ocupa de la interacción química, que describe las reacciones químicas indeseadas que pueden tener lugar entre las sustancias químicas de la planta (Heikkilä, 1999).

Subíndice de calor de reacción para la reacción principal (I_{RM}): dado que la posible violencia de las reacciones reside en el calor liberado y en la temperatura que se puede alcanzar, se ha seleccionado el cambio de energía durante la reacción para representar la seguridad de la reacción en el ISI (Heikkilä, 1999). La entalpía liberada o absorbida en un proceso puede describirse mediante la ecuación 6.4, donde $\Sigma H_{f_{prod}}$ es la entalpía de formación de los productos y $\Sigma H_{f_{reac}}$ es la entalpía de formación de los reactivos.

$$H_r = \Sigma H_{f_{prod}} - \Sigma H_{f_{reac}} \quad (6.4)$$

Las reacciones químicas se clasifican de la siguiente manera: extremadamente exotérmica (≥ -3000 J/g), fuertemente exotérmico (< -3000 J/g), moderadamente exotérmico (< -1200 J/g), levemente exotérmico (< -600 J/g), térmicamente neutra (≤ -200 J/g) o endotérmico. A partir de estos valores se determina la puntuación

para los subíndices I_{RM} y I_{RS} de acuerdo con la tabla 6.2. Si hay varias reacciones principales, por ejemplo, una reacción en serie, la puntuación del subíndice se determina en función de la reacción total. Si hay varios reactores en el proceso, la puntuación se determina sobre el reactor con mayor liberación de calor (Heikkilä, 1999).

Tabla 6.2. Determinación de los subíndices de calor de reacción I_{RM} y I_{RS}

Calor de reacción	Puntuación
Térmicamente neutra ≤ -200 J/g	0
Levemente exotérmico < -600 J/g)	1
Moderadamente exotérmico < -1200 J/g	2
Fuertemente exotérmico < -3000 J/g	3
Extremadamente exotérmica ≥ -3000 J/g	4

Fuente: elaboración propia.

Subíndice de calor de reacción para la reacción secundaria (I_{RS}): este subíndice se determina de forma similar al subíndice de reacción principal. La liberación de calor para cada una de las posibles reacciones secundarias se calcula de acuerdo con la ecuación 6.4. Las mismas puntuaciones de seguridad que se utilizaron para la reacción principal también se utilizan para las reacciones secundarias (tabla 6.2). Siempre se considera el mayor valor de calor de reacción en caso de tener varias reacciones secundarias (Heikkilä, 1999).

Subíndice de interacción química (I_{INT}): la interacción química considera las reacciones no deseadas de las sustancias del proceso con los materiales de la planta. Se espera que estas reacciones tengan lugar fuera del reactor; por lo tanto, no se tratan en el subíndice de reacción secundaria. El peor escenario en la interacción química es considerado para los cálculos (Heikkilä, 1999). En la tabla 6.3 se presentan las puntuaciones para este subíndice; el incendio y la

explosión se consideran las consecuencias más peligrosas de una interacción no deseada.

Tabla 6.3. Determinación del subíndice de interacción química

Interacción química	Puntuación I_{INT}
Formación de calor	1-3
Incendio	4
Formación de gases no inflamables e inofensivos	1
Formación de gases tóxicos	2-3
Formación de gases inflamables	2-3
Explosión	4
Polimerización	2-3
Sustancias tóxicas solubles	1

Fuente: elaboración propia.

6.1.1.2. Subíndices de sustancia peligrosa

Los subíndices de inflamabilidad, explosividad y exposición tóxica (I_{FL} , I_{EX} y I_{TOX}) se determinan para cada sustancia dentro del proceso. Estos subíndices se suman para cada sustancia y la suma máxima se emplea como valor para el subíndice de sustancia peligrosa. Por su parte, el subíndice de corrosividad (I_{COR}) se determina respecto a la sustancia química más corrosiva (Heikkilä, 1999).

Subíndice de inflamabilidad (I_{FL}): este subíndice describe la inflamabilidad del líquido, que es medida a través del punto de destello (*flash point*) y ebullición. Las sustancias se dividen en no combustibles, combustibles, inflamables, fácilmente inflamables y muy inflamables, de acuerdo con lo cual se asigna la puntuación para el subíndice I_{FL} como se muestra en tabla 6.4.

Tabla 6.4. Determinación del subíndice de inflamabilidad

Inflamabilidad	Puntuación I_{FL}
No inflamable	0
Combustible (Flash point $>55^{\circ}\text{C}$)	1
Inflamable (Flash point $< 55^{\circ}\text{C}$)	2
Fácilmente inflamables (Flash point $< 21^{\circ}\text{C}$)	3
Muy inflamable (Flash point $<0^{\circ}\text{C}$ y punto de ebullición $<35^{\circ}\text{C}$)	4

Fuente: elaboración propia.

Subíndice de explosividad (I_{EX}): este subíndice describe la tendencia de un gas a formar una mezcla explosiva con el aire. Los rangos explosivos, expresados en porcentaje de volumen de vapor de combustible en el aire, son intervalos de concentración de vapor o mezcla de gases con aire que se quemarán por la ignición. Si una mezcla dentro de su rango explosivo de concentración es quemada, se producirá la propagación de la llama. El rango será indicado por LEL (*Lower Explosive Limit*) o UEL (*Upper Explosive Limit*). Este modelo es una estimación aproximada pero útil cuando la mayoría de las propiedades químicas no están disponibles. La explosividad está determinada por la diferencia entre LEL y UEL (Heikkilä, 1999). Las puntuaciones para este subíndice se muestran en la tabla 6.5.

Tabla 6.5. Determinación del subíndice de explosividad

Explosividad (UEL-LEL) % v/v	Puntuación I_{EX}
No explosivo	0
0-20 %	1
20-45 %	2
45-70 %	3
70-100 %	4

Fuente: elaboración propia.

Subíndice de exposición tóxica (I_{TOX}): los riesgos para la salud causados por las sustancias químicas están representados por el

subíndice de exposición tóxica (I_{TOX}). En el ISI, la evaluación de la exposición tóxica se basa en los TLV, previamente definidos en el capítulo 3; estos datos están disponibles para la mayoría de las sustancias. Los valores de TLV expresan los límites, por exposición dérmica o respiración, nocivos de las sustancias en el umbral de tiempo de 8 horas. El valor del subíndice es más alto, cuando el TLV es más bajo, es decir, la sustancia es más tóxica (Heikkilä, 1999). La tabla 6.6 muestra las puntuaciones asignadas para este subíndice conforme a los rangos de TLV.

Tabla 6. Determinación del subíndice de exposición tóxica

Límite Tóxico (ppm)	Puntuación I_{TOX}
TLV > 10.000	0
TLV ≤ 10.000	1
TLV ≤ 1.000	2
TLV ≤ 100	3
TLV ≤ 10	4
TLV ≤ 1	5
TLV ≤ 0,1	6

Fuente: elaboración propia.

Subíndice de corrosividad (I_{COR}): los materiales corrosivos incluyen, por ejemplo, ácidos, anhídridos ácidos y álcalis. Estos materiales suelen corroer las tuberías, los recipientes y otros equipos de proceso, lo que puede provocar una pérdida de contención y el consiguiente incendio, explosión o liberación de sustancias tóxicas. El material de construcción de los equipos se selecciona de forma que no se supere la tasa de corrosión durante la vida útil del equipo. Dado que la necesidad de un mejor material suele estar ligada a ambientes corrosivos, puede justificarse una clasificación basada en el tipo de material de construcción (Heikkilä, 1999). En el índice de seguridad inherente la corrosividad se determina en

función del material de construcción requerido como se muestra en la tabla 6.7.

Tabla 6.7. *Determinación del subíndice de corrosividad*

Material de construcción requerido	Puntuación I_{COR}
Acero al carbono	0
Acero inoxidable	1
Materiales especiales	2

Fuente: elaboración propia.

6.1.2. Índice de seguridad inherente de proceso

El índice de seguridad inherente de proceso (I_{PI}) expresa la seguridad inherente con respecto a los equipos y los parámetros de operación (Heikkilä, 1999). El índice se ha dividido en subíndices para el inventario, la temperatura, la presión, la seguridad del equipo y la estructura segura del proceso.

6.1.2.1. Subíndice de Inventario (I_I)

Un cálculo exacto del inventario resulta difícil en la fase de diseño conceptual, ya que el tamaño de los equipos no suele conocerse. Sin embargo, los flujos de masa se conocen a partir de la capacidad de diseño del proceso. Por lo tanto, es práctico basar la estimación del inventario en los flujos de masa y en un tiempo de residencia estimado. En consecuencia, el inventario se ha incluido en el ISI como flujo de masas en el equipo ISBL, incluidas las recirculaciones, con un tiempo de residencia nominal de una hora para cada equipo del proceso (ejemplo: reactor, columna de destilación). El inventario total es la suma de los inventarios de todos los equipos

de proceso. En cuanto al OSBL, normalmente no se conocen los tamaños de los tanques en el diseño conceptual, lo que significa que este parámetro no se calcula fácilmente. El inventario OSBL no solo depende del tipo de proceso, sino también de las condiciones locales, la logística, entre otras (Heikkilä, 1999). En la tabla 6.8 se presenta la puntuación para determinar este subíndice.

Tabla 6.8. Determinación del subíndice de inventario

Inventario		Puntuación I_i
ISBL	OSBL	
0-1 t	0-10 t	0
1-10 t	10-100 t	1
10-50 t	100-500 t	2
50-200 t	500-2000 t	3
200-500 t	2000-5000 t	4
500-1000 t	5000-10000t	5

Fuente: elaboración propia

6.1.2.2. Subíndice de temperatura de proceso (I_T)

La temperatura es un indicador de la energía térmica en el sistema. El peligro aumenta a temperaturas más altas debido al gran contenido de energía y también porque la resistencia de los materiales se debilita a temperaturas altas o muy bajas. Los grandes cambios de temperatura entre el ambiente y las temperaturas de operación también son fuentes de estrés térmico que puede causar un mayor riesgo de pérdida de contención (Heikkilä, 1999). La temperatura de proceso para el ISI se determina sobre la base de la temperatura máxima en el área de proceso bajo investigación. La tabla 6.9 muestra la puntuación de acuerdo con la temperatura de proceso.

Tabla 6.9. Determinación del subíndice de temperatura

Temperatura	Puntuación I_T
$0 < ^\circ\text{C}$	1
0-70 $^\circ\text{C}$	0
70-150 $^\circ\text{C}$	1
150-300 $^\circ\text{C}$	2
300-600 $^\circ\text{C}$	3
$> 600 \text{ }^\circ\text{C}$	4

Fuente: elaboración propia.

6.1.2.3. Subíndice de Presión de proceso (I_p)

La presión es un indicador de la energía potencial que afecta las tasas de fuga en el caso de pérdida de contención. Las presiones más altas también se asocian a requisitos más estrictos en la resistencia de los equipos. Las fugas en el equipo de vacío pueden causar la entrada de aire y la consiguiente explosión (Heikkilä, 1999). En el índice de seguridad inherente (ISI) la presión del sistema se determina sobre la base de la presión máxima en la zona del proceso en condiciones normales de funcionamiento. En la tabla 6.10 se muestran las puntuaciones para el subíndice de presión.

Tabla 6.10. Determinación del subíndice de presión

Presión	Puntuación I_p
0,5-5 bar	0
5-25 bar	1
25-50 bar	2
50-200 bar	3
200-1000 bar	4

Fuente: elaboración propia.

6.1.2.4. Subíndice de equipo seguro (I_{EQ})

La evaluación de la seguridad del equipo depende del equipo en sí y de las condiciones de proceso. La seguridad del equipo puede ser evaluada a partir de datos cuantitativos de accidentes y fallas, así como de la práctica y recomendaciones de ingeniería. Para el subíndice de seguridad del equipo, el área de la planta de proceso se divide en dos áreas diferentes, con diversas propiedades de seguridad. El área *in situ* es el área donde las materias primas se transforman en productos. Esto se conoce como el área de límites de la batería interna (ISBL), caracterizada por una gran cantidad de equipos y tuberías ubicadas en un área pequeña. El resto de la planta se denomina área de límites externos o fuera de la batería (OSBL), la cual incluye grandes inventarios de fluidos, que a menudo son inflamables o tóxicos. El número de equipos en el área OSBL es más pequeño, pero su tamaño es mayor que en el área ISBL. El diseño está mucho más disperso en OSBL que en ISBL, lo cual mejora la seguridad (Heikkilä, 1999).

Subíndice de seguridad de equipos ISBL: los hornos y los calentadores se consideran los equipos más inseguros, seguidos por compresores y reactores de alto riesgo. Luego aparecen enfriadores de aire, reactores ordinarios y bombas de alto riesgo. En seguida se ubican las torres, intercambiadores de calor y bombas. El último y más seguro grupo está formado por equipos que manipulan materiales no inflamables y no tóxicos. En la tabla 6.11 se presenta la puntuación para determinar este subíndice.

Tabla 6.11. *Determinación del subíndice de seguridad de equipos ISBL*

Equipos ISBL	Puntuación I_{EQ}
Equipos de almacenamiento, materiales no tóxicos	0
Intercambiadores, torres, bombas	1
Enfriadores de aire, reactores, bombas de alta presión	2
Compresores, reactores	3
Hornos y calentadores de aire	4

Fuente: elaboración propia.

Subíndice de seguridad de equipos OSBL: para equipos OSBL, se asignan ponderaciones en el rango 0-3. En casos de emergencia, la propagación de los daños al resto de la planta se puede contener al cortar o aislar líneas peligrosas del límite de batería. Además, gran parte de los riesgos de OSBL se deben al gran inventario de productos químicos inflamables o tóxicos, los cuales se analizan en los índices de inventario, inflamabilidad y toxicidad, no en el índice de seguridad del equipo. También, un mismo equipo de igual dimensionamiento es probablemente más seguro en OSBL que en ISBL debido al mayor distanciamiento entre ellos (Heikkilä, 1999). La tabla 6.12 muestra las puntuaciones para seguridad de equipos OSBL.

Tabla 6.12. *Determinación del subíndice de seguridad de equipos OSBL*

Equipos OSBL	Puntuación I_{EQ}
Equipos de almacenamiento, materiales no tóxicos	0
Tanques atmosféricos, bombas	1
Torres de enfriamiento, compresores, presurizadores y tanques de refrigeración	2
Hornos, hervidores y teas	3

Fuente: elaboración propia.

6.1.2.5. Subíndice de estructura segura de proceso

Una estructura de proceso define las operaciones que están involucradas en un proceso y cómo se conectan entre sí. Por lo tanto, el subíndice de estructura segura de procesos describe los riesgos de una operación desde el punto de vista de la ingeniería del sistema. En este sentido, se evidencia qué tan bien funcionan, de manera conjunta, ciertas operaciones de la unidad u otros elementos del proceso, es decir, cómo se deben conectar y controlar juntos. El subíndice también describe cómo los sistemas auxiliares, como los sistemas de refrigeración o calefacción, deben configurarse y conectarse al proceso principal. Las estructuras de proceso se dividen en seis grupos con puntajes de 0 a 5 según el conocimiento de su comportamiento de seguridad operacional (Heikkilä, 1999), como se presentan en la tabla 6.13. La puntuación final del subíndice se elige sobre la base del peor escenario. Los resultados se pueden usar con otros subíndices para estimar la seguridad inherente total de las alternativas de proceso, para la selección de la ingeniería conceptual del proceso, o para definir detalles de la configuración del proceso.

Tabla 6.13. Determinación del subíndice de estructura segura de proceso

Nivel de seguridad de la estructura del proceso	Puntuación I_{ST}
Recomendado	0
Práctica de ingeniería sólida	1
Sin datos o neutral	2
Probablemente inseguro	3
Accidentes leves	4
Accidentes mayores	5

Fuente: elaboración propia.

6.2. Investigaciones recientes de evaluaciones de seguridad de biorprocesos y biorrefinerías

En general, los diseños de biorrefinerías presentan menos avances en cuanto a los aspectos de seguridad, y todavía hay pocos datos sobre la evaluación y la gestión de riesgos (Salvatore et al., 2013). Lauri et al. (2019) identificaron los problemas de seguridad de un enfoque de biorrefinería para la producción de bioetanol, destacando los peligros asociados a la manipulación del biocombustible y las fuentes de emisión en caso de fallo de los componentes. Meramo-Hurtado et al. (2020) llevaron a cabo la síntesis y la evaluación de la sostenibilidad de una biorrefinería lignocelulósica de múltiples materias primas considerando indicadores ambientales, económicos y de seguridad, e informando de un retorno sostenible de la inversión del 27,29 %. Pinedo et al. (2016) aplicaron el análisis preliminar de riesgos (PHA) y el análisis de árbol de eventos (ETA) para estimar las consecuencias y frecuencias de los riesgos en las alternativas de biorrefinería de microalgas, encontrando importantes consecuencias de accidentes en la liberación de n-hexano. Sultana & Haugen (2022) hicieron desarrollaron un índice de seguridad del sistema inherente (ISSI) para la clasificación de procesos químicos en la etapa de desarrollo conceptual, con esta metodología se evaluaron diferentes rutas para producir metacrilato de metilo (MMA), la ruta más insegura fue la de producción de MMA a partir de acetona cianohidrina, lo que se debe a que esta tiene más etapas, equipos y flujos que las demás rutas evaluadas. Wei et al. (2020) determinaron el índice de seguridad inherente extendido (EISI) o análisis de seguridad inherente química, física y biológica. Esta metodología se empleó para evaluar procesos en etapa conceptual.

6.3. Resultados

Para determinar el índice de seguridad químico, se analizó la naturaleza de cada una de las sustancias químicas involucradas en la biorrefinería de camarón, las posibles interacciones entre ellas, los materiales de la planta y las reacciones químicas. El subíndice de reactividad química se determinó calculando el calor de reacción por medio de la ecuación 6.4. Se encontró que para la biorrefinería de camarón las reacciones principales ocurren en las unidades de desmineralización, desproteínezación y desacetilación, mientras que las reacciones secundarias corresponden a las neutralizaciones. La reacción principal más exotérmica ($\Delta H_f = -4.616,9\text{J/g}$) se registra en la etapa de desacetilación en la que la quitina se transforma en quitosano mediante eliminación de los grupos acetilo (ver ecuación 2.62) (Hossain & Iqbal, 2014). Por su parte, las reacciones secundarias mostraron un comportamiento neutro. Por lo tanto, se establece una puntuación de 4 y 0 para los subíndices $I_{RM,max}$ y $I_{RS,max}$, respectivamente. Se encontró que la interacción química más peligrosa está dada por la formación de gases inflamables debido a la presencia de cloruro de calcio en el proceso. Esta sustancia libera vapores altamente inflamables en contacto con el agua; por lo tanto, se asigna un valor de 3 para el subíndice $I_{INT,max}$. Las sustancias más peligrosas del proceso se presentan en la tabla 6.14; las propiedades relacionadas con la toxicidad, explosividad e inflamabilidad se revisaron en las hojas de seguridad. La acetona y el etanol alcanzaron el valor más alto para el subíndice $I_{(FL+EX+TOX)max}$; por lo tanto, resultaron ser las sustancias más peligrosas dentro de la biorrefinería. Ambas sustancias tienen igual valor en los subíndices de toxicidad y explosividad, sin embargo, la acetona resulta ser más inflamable que el etanol. En este sentido, para el subíndice de sustancia peligrosa se asigna una puntuación de 7.

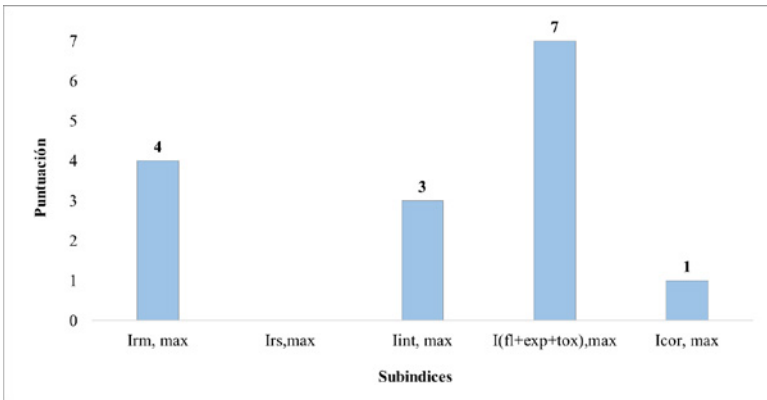
Tabla 6.14. *Parámetros de seguridad para sustancias peligrosas*

Sustancias	Acetona	Etanol
TLV (ppm)	500	1.000
I_{TOX}	2	2
Punto de inflamación (°C)	-10	12
I_{FL}	4	3
(UEL - LEL) _{VOL,%}	10,8	11,5
I_{EX}	1	1
$I_{TOX} + I_{FL} + I_{EX})_{max}$	7	6

Fuente: elaboración propia.

Además, se evaluó el material de construcción de los equipos en función de los requerimientos de las sustancias. Para ello, se consultaron los materiales que podían ser empleados en tablas de compatibilidad química. Debido a la presencia de sustancias corrosivas, como el bisulfito de sodio, los cloruros y el NaOH, algunos equipos requieren de acero inoxidable como material de construcción; por lo tanto, se asigna una puntuación de 1 para el subíndice $I_{COR,máx}$. De acuerdo con lo anterior, el índice de seguridad química inherente para la biorrefinería de camarón se estimó en 15, como se presenta en la figura 6.1. Los principales riesgos del proceso están asociados a la naturaleza altamente exotérmica de la reacción de formación de quitosano y las propiedades tóxicas, explosivas e inflamables de la acetona y etanol. Para disminuir el I_{CI} se podría evaluar el uso de disolventes menos peligrosos en las etapas de despigmentación. Diferentes estudios se han realizado en torno al uso de disolventes verdes como los ácidos eutécticos (Sivagnanam et al., 2018; Meramo-Hurtado et al., 2019), los cuales pueden resultar más seguros.

Figura 6.1. Subíndices de seguridad química para la topología de biorrefinería de camarón



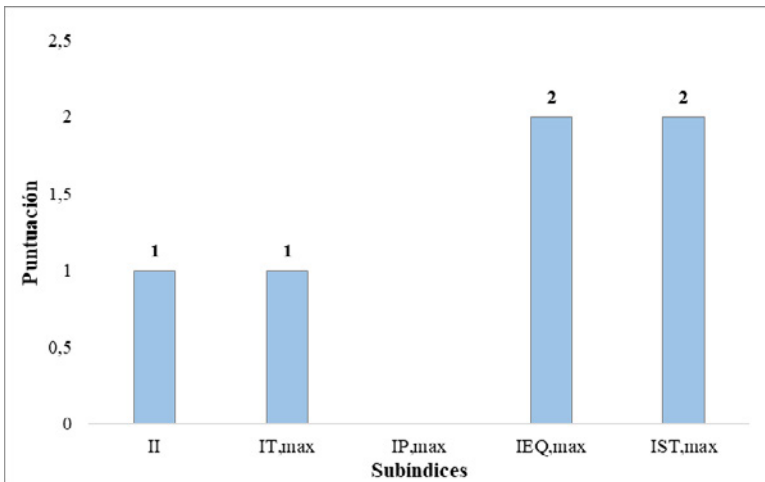
Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, el análisis de seguridad inherente consideró la evaluación de las condiciones de operación. El inventario total de la biorrefinería de camarón se estimó en 6,2 t/h, por lo que se asignó una puntuación de 1 para el subíndice de inventario. La temperatura máxima se registró en el reactor de desacetilación (110°C), lo que corresponde a asignar una puntuación de 1 para $I_{T,max}$. Por su parte, se encontró que la presión no representa un riesgo para el proceso debido a que en todas las etapas se mantiene en condiciones cercanas a 1 atm; por lo tanto, la puntuación para el subíndice de presión es nula.

Otro factor importante en la seguridad de procesos es la confiabilidad de los equipos. La escala tomada para determinar el subíndice de equipo seguro considera a los hornos como los equipos más peligrosos y a los que manejan materiales no inflamables y tóxicos como los equipos más seguros; en este sentido los reactores donde se efectúan las reacciones de desproteínización, desmineralización, desacetilación y neutralización son los equipos

más inseguros dentro de la biorrefinería con una puntuación de 2 para $I_{EQ,max}$. Finalmente, la estructura segura de proceso se refiere a la descripción de la seguridad del proceso desde el punto de vista del ingeniero, es decir, responde a cómo dos equipos, unidades o procesos trabajan juntos y cómo deben estar conectados y controlados conjuntamente (Heikkilä, 1999; Hong et al., 2018). Ante la falta de información sobre la seguridad de una biorrefinería a base de camarón, se asume una posición neutral que corresponde a asignar una puntuación de 2 para $I_{ST,max}$. El índice de seguridad de proceso se estimó en 6 como se muestra en la figura 6.2. Desde este punto de vista, los principales riesgos estuvieron relacionados con la seguridad de los equipos y la temperatura del proceso.

Figura 6.2. Subíndices de seguridad química para la topología de biorrefinería de camarón

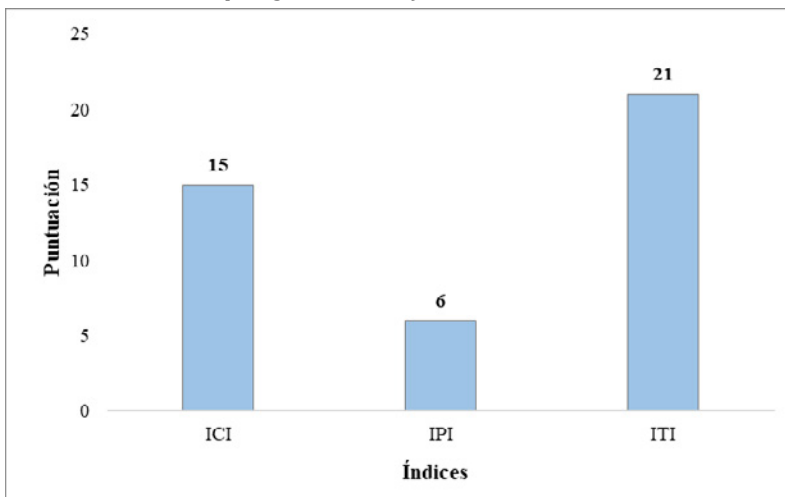


Fuente: elaboración propia.

El índice de seguridad inherente total se calculó en 21 para la topología de biorrefinería de camarón como se muestra en la figura

6.3. Los principales riesgos se identificaron en las secciones de recuperación de quitina, producción de quitosano y recuperación de astaxantina, dado el uso de sustancias altamente inflamables, equipos inseguros y altas temperaturas. La sección de procesamiento de camarones no tiene asociado riesgos inherentes, razón por la cual es considerada una operación segura. En general, la biorrefinería mostró un comportamiento deseado en términos de seguridad de procesos, considerando que una puntuación inferior a 24 para I_T indica que un proceso es inherentemente seguro (Heikkilä, 1999).

Figura 6.3. Índice total de seguridad inherente para la topología de biorrefinería de camarón

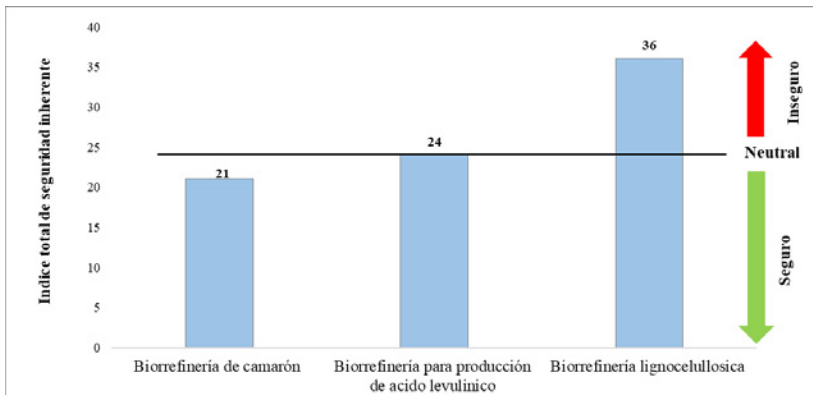


Fuente: elaboración propia.

La comparación de los resultados obtenidos para la biorrefinería de camarón con los resultados publicados para otras biorrefinerías se presenta en la figura 6.4. Una biorrefinería para la producción industrial de ácido levulínico mediante deshidratación catalizada por ácido (Meramo-Hurtado, 2019) mostró un rendimiento neutro

con I_{TI} un igual a 24. Mientras que una biorrefinería lignocelulósica de múltiples materias primas (Meramo-Hurtado, 2020) alcanzó una puntuación de 36 para el índice total de seguridad inherente. Ambas biorrefinerías consultadas se presentaron como procesos industriales, por lo tanto, los inventarios manejados son mucho mayores que los manejados por una planta piloto como la biorrefinería propuesta, lo que aumenta el riesgo de los procesos (Heikkilä, 1999). Además, las biorrefinerías consultadas involucran condiciones de operación extremas; presiones entre 24, 67 y 32 atm, y temperaturas de aproximadamente 750°C, lo que aumenta considerablemente el riesgo inherente de estos procesos.

Figura 6.4. Comparación del índice total de seguridad inherente para la topología de biorrefinería de camarón



Fuente: elaboración propia.

6.4. Conclusiones

La topología de biorrefinería de camarón muestra un buen desempeño en términos de seguridad inherente, con un índice total de

seguridad inherente igual a 21. Los índices de seguridad inherente química y de proceso alcanzan valores iguales a 15 y 6, respectivamente. Los principales riesgos están asociados al subíndice de reactividad química dado a la reacción altamente exotérmica que toma lugar en la etapa de desacetilación y al subíndice de sustancia peligrosa debido a la presencia de acetona en la segunda unidad de despigmentación que es una sustancia altamente inflamable y tóxica. Por otro lado, los equipos más inseguros del proceso son los reactores, mientras que las condiciones de operación de la biorrefinería (temperatura, presión, inventario) no representan riesgos.

Referencias

- Abedi P. & Shahriari, M. (2005). Inherent safety evaluation in process plants - A comparison of methodologies. *Central European Journal of Chemistry*, 3(4), 756–779. doi: 10.2478/BF02475203.
- Heikkilä, A. (1999). *Inherent safety in process plant de-sign: An index-based approach*. Technical Research Centre of Finland.
- Hong, S., Yuan, Y., Yang, Q., Zhu, P. & Lian, H. (2018). Versatile acid base sustainable solvent for fast extraction of various molecular weight chitin from lobster shell. *Carbohydrate Polymers*, 201, 211–217. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.08.059.
- Hossain, M. & Iqbal, A. (2014). Production and characterization of chitosan from shrimp waste. *Journal of the Bangladesh Agricultural University*, 12(1), 153–160.
- Lauri, R. & Pietrangeli, B. (2019). Biorefinery Safety: A Case Study Focused on Bioethanol Production. In V. Beschkov. (Ed.), *Biorefinery Concepts, Energy and Products*. IntechOpen.
- Li, X., Zanwar, A., Jayswal, A., Lou, H. & Huang, Y. (2011). Incorporating exergy analysis and inherent safety analysis for sustainability

- assessment of biofuels. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(5), 2981–2993. doi: 10.1021/ie101660q.
- Meramo-Hurtado, S., Ojeda, K. & Sánchez-Tuirán, E. (2019). Environmental and Safety Assessments of Industrial Production of Levulinic Acid via Acid-Catalyzed Dehydration. *ACS Omega*, 4(27), 22302–22312. doi: 10.1021/acsomega.9b02231.
- Meramo-Hurtado, S., Sánchez-Tuirán, E., Ponce-Ortega, J., El-Halwagi, M. & Ojeda-Delgado, K. (2020). Synthesis and Sustainability Evaluation of a Lignocellulosic Multifeedstock Biorefinery Considering Technical Performance Indicators. *ACS Omega*, 5, 9259–9275. doi: 10.1021/acsomega.0c00114.
- Pinedo, J., García Prieto, C., D'Alessandro, A., Ibáñez, R., Tonelli, S., Díaz, M. & Irabien, A. (2016). Microalgae biorefinery alternatives and hazard evaluation. *Chemical Engineering Research and Design*, 107, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.039>.
- Salvatore, D., Bubbico, R. & Di, L. (2013). Environmental and Safety Aspects of Integrated Biorefineries (IBR) in Italy. *Chemical Engineering Transactions*, 32, 169–174.
- Sivagnanam, P., Cong, T., Chae, S., Cho, Y. & Park, J. (2018). Deep eutectic solvent-based extraction and fabrication of chi-tin films from crustacean waste. *Carbohydrate Polymers*, 195, 622–630. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.05.018.
- Sultana S. & Haugen, S. (2022). Development of an inherent system safety index (ISSI) for ranking of chemical processes at the concept development stage. *Journal of Hazardous Materials*, 421. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126590>.
- Wei, A., Kuznetsova, E., Jonathan, T. & Sheng, A. (2020). Extended inherent safety index -Analysis of chemical, physical and biological inherent safety. *Journal of Cleaner Production*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119258>.



Capítulo VII.

**Evaluación de impactos
sociales de una biorrefinería
de camarón**

La dimensión social de los sistemas de valorización de residuos ha sido objeto de un seguimiento marginal en las evaluaciones de sostenibilidad. Según Krause et al. (2020), el pilar social debe considerarse como un primer paso en las prácticas acuícolas. Los impactos sociales y socioeconómicos positivos o negativos de un proyecto, servicios y productos, pueden medirse con una evaluación del ciclo de vida social (s-LCA) (Herrera & Corona, 2020; Tokede & Traverso 2022). La s-LCA informa sobre cómo los seres humanos se ven afectados por un producto o actividad empresarial a lo largo de su ciclo de vida (Tokede & Traverso, 2020). También proporciona apoyo para la toma de decisiones sobre alternativas que mejoren las condiciones sociales de todas sus partes interesadas (consumidores, actores de la cadena de valor, comunidad, trabajadores y sociedad) (Huertas-Valdivia et al., 2020).

7.1. Evaluación del ciclo de vida social (s-LCA)

Una de las metodologías de evaluación del ciclo de vida social más utilizadas es la que sigue las directrices publicadas por el Programa

de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC) (2009). Dichas directrices se ajustan a las fases de aplicación de la norma ISO 14040, es decir, la definición del objetivo y alcance, el inventario, la evaluación del impacto y la interpretación (Zira et al., 2020). Los indicadores del ciclo de vida social son muy diversos como salud, seguridad, derechos humanos, responsabilidad, número de muertes, valor social agregado, gobernanza, entre otros (Tokede & Traverso, 2022).

7.1.1 Definición del objetivo y alcance

El primer paso de la metodología tiene como fin definir claramente el objetivo del estudio; y este a su vez determina el alcance. Según Zira et al. (2020) y Gnansounou (2017), esta primera etapa incluye:

- Describir la función del sistema de productos y unidad funcional.
- Describir el sistema del producto.
- Establecer el ciclo de vida del producto/ servicio.
- Definir los límites del análisis.
- Establecer las categorías de impacto.

Se identifican cuatro aplicaciones principales para un análisis de ciclo de vida: nivel producto, nivel organizacional, nivel nacional y nivel consumidor. La evaluación del diseño de procesos implica aplicar la metodología a nivel organizacional (Cadena et al., 2019).

7.1.2. Inventario

El objetivo del inventario es recoger y cuantificar los datos de entrada y salida en cada nivel de proceso unitario o de bloque. En

esta etapa se recopilan datos sobre todas las actividades relacionadas con las diferentes partes interesadas. En el diseño del proceso de producción, donde el sistema no está claramente definido y algunas partes interesadas aún no están involucradas, la recopilación de datos resulta una tarea difícil. Cuando un proyecto ha estado en desarrollo, involucrar a las partes interesadas en el proceso de evaluación puede ser problemático, porque alguno de ellos no sabe cómo van a involucrarse en el sistema.

Según la ISO 14044 esta etapa incluye seis pasos:

1. Preparación para la recogida de datos.
2. Recolección de datos.
3. Validación de datos.
4. Relacionamiento de los datos con la unidad funcional.
5. Agrupación de datos.

Los datos recopilados deben cubrir datos cuantitativos sobre la actividad del proceso, como valores predichos para las actividades del proceso, noticias sobre las partes interesadas, informes financieros y sostenibles de organizaciones que realizan actividades similares en el mercado, datos relevantes para la identificación de las partes interesadas e interacción de las partes interesadas.

En esta etapa se seleccionan los grupos interesados, las subcategorías y los indicadores de rendimiento. Para esta selección se suele emplear el esquema de la teoría del cambio.

Las directrices proponen considerar cinco categorías de partes interesadas. Estas representan agrupaciones de interesados con mayor probabilidad de verse afectados por las actividades de las organizaciones pertenecientes al sistema de productos.

- Trabajadores/empleados: individuos que proporcionan sus habilidades a una empresa, generalmente a cambio de una remuneración económica.

- Comunidades locales: aglomeración de individuos relacionados espacialmente que utilizan una base de recursos compartida dentro de la cual existe una empresa.
- Consumidores: son quienes utilizan los bienes y servicios comprados por ellos o proporcionados por otros. El supuesto es que el consumidor o cliente es la máxima prioridad para una empresa.
- Sociedad: todos los demás grupos sociales fuera de los límites de los ya enumerados están incluidos en la categoría de sociedad.
- Otros actores de la cadena de valor: incluye los impactos sociales potenciales de la relación entre productores-compradores y proveedores-vendedores. Los proveedores o actores de la cadena de valor son partes interesadas que proporcionan bienes o servicios que son utilizados en las empresas.

Además, las directrices proponen una lista de posibles impactos sociales a considerar, denominados subcategorías de impacto, que se derivan de seis amplias categorías de impacto: derechos humanos, condiciones de trabajo, salud y seguridad, patrimonio cultural, gobernanza y contribución socioeconómica. Estas subcategorías de impacto se clasifican según la categoría de partes interesadas a las que están asociadas, como se muestra en la tabla 7.1.

Tabla 7.1. Clasificación de las subcategorías de impacto

Categorías de partes interesadas	Subcategorías de impacto
Trabajadores	Libertad de asociación y negociación colectiva
	Trabajo infantil
	Salario justo
	Horas laborales
	Trabajo forzado
	Igualdad/discriminación
	Salud y seguridad
	Beneficios sociales y seguridad social
Comunidad local	Acceso a recursos materiales
	Acceso a recursos inmateriales
	Deslocalización y migración
	Patrimonio cultural
	Condiciones de vida seguras y saludables
	Derechos de los pueblos indígenas
	Participación de la comunidad
	Empleo local
	Vida segura
Sociedad	Compromiso público en cuestiones de desarrollo sostenible
	Contribución al desarrollo económico
	Prevención y mediación de conflictos armados
	Desarrollo tecnológico
	Corrupción
Consumidores	Salud y seguridad
	Mecanismos de retroalimentación
	Privacidad del consumidor
	Transparencia
	Responsabilidad al final de la vida
Otros actores de la cadena de valor	Competencia saludable
	Respeto a los derechos de propiedad intelectual
	Fomento de la responsabilidad social empresarial
	Relaciones con proveedores
	Fin de la vida
	Mecanismos de retroalimentación

Fuente: elaboración propia.

7.1.3. Evaluación del impacto

En esta fase se establecen las relaciones entre los datos del inventario y las categorías de impacto, seguidas de modelos de caracterización para estimar los impactos con los indicadores de rendimiento (García-Sánchez & Güereca, 2019). Actualmente, no existen cálculos o modelos de caracterización estandarizados con base científica para los parámetros del inventario del ciclo de vida social o un método de evaluación de impacto social aceptado internacionalmente (Franze & Ciroth, 2011). Varios autores han propuesto métodos de cálculo, como los sistemas de puntuación que utilizan puntos de referencia de desempeño (PRD) para evaluar datos de inventario (Prasara-A & Gheewala, 2018). Dado que estos indicadores pueden reflejar impactos positivos o negativos, se emplea el método de desempeño social propuesto por García-Sánchez & Güereca (2019) para los indicadores con contribuciones positivas (avance) o negativas (retroceso) en el desempeño social. Los indicadores se normalizan respetando el "método de normalización lineal min-max" para su estandarización en una escala de 0-1, como indican las ecuaciones 7.1 y 7.2.

$$\begin{array}{l} \text{Dirección} \\ \text{de avance} \end{array} \quad \text{Indicador}' = \frac{\text{Indicador} - \text{Indicador}_{\text{ref,min}}}{\text{Indicador}_{\text{ref,max}} - \text{Indicador}_{\text{ref,min}}} \quad (7.1)$$

$$\begin{array}{l} \text{Dirección} \\ \text{inversa} \end{array} \quad \text{Indicador}' = \frac{\text{Indicador}_{\text{ref,max}} - \text{Indicador}}{\text{Indicador}_{\text{ref,max}} - \text{Indicador}_{\text{ref,min}}} \quad (7.2)$$

Donde (*Indicador*) es el valor de la métrica, ($\text{Indicador}_{\text{ref,min}}$) y ($\text{Indicador}_{\text{ref,max}}$) son las referencias mínima y máxima del indicador, respectivamente. Una dirección hacia adelante significa que el valor del indicador está positivamente correlacionado con los cambios sociales deseados, derivados de cualquier intervención. El

resultado social se determina siguiendo un modelo agregativo que promedia los valores de cada indicador ya normalizados.

7.1.4. Interpretación

Los resultados de cada indicador de rendimiento se interpretan según el valor de referencia definido en 0,5. Para un valor de puntuación entre 0,5 y 1, el rendimiento de la biorrefinería es mejor que el punto de referencia. Para valores inferiores a 0,5, el indicador presenta un desempeño social no deseado y que requiere posibles estrategias de mejora (Cadena et al., 2019).

Las revisiones de las metodologías s-LCA han identificado que la selección de indicadores sociales y subcategorías de impacto es una de las principales deficiencias de su aplicación (Chang et al., 2017). La identificación de los resultados deseados y de cómo se alcanzarían podría ayudar a elegir los indicadores más representativos y, en consecuencia, a superar dicha limitación. El enfoque de la teoría del cambio parece ser atractivo para este propósito porque identifica mecanismos o estrategias para producir cambios positivos en los beneficiarios finales (Ghate. 2018). Se trata de un proceso de análisis de cómo y por qué una intervención social podría conducir a los resultados finales previstos (Makuwira, 2016). A pesar de los beneficios comprobados de la teoría del cambio para aumentar la variabilidad, su uso se ha limitado al análisis cualitativo y ningún trabajo de s-LCA la abarca dentro de la fase de inventario, como se evidencia en la tabla 7.2. En este contexto, la incorporación de los esquemas de la teoría del cambio dentro del enfoque s-LCA podría abordarse para diferentes estudios de caso como los sistemas de biorrefinería.

Tabla 7.2. *Trabajos recientes de la metodología s-LCA y teoría del cambio aplicados a enfoques de biorrefinería*

Materia prima de biorrefinerías	Metodología s-LCA	Teoría del cambio	Fuente
Vástagos de café cortados	✓		Aristizábal-Marulanda et al. (2020)
Biomasa de pino	✓		Valente et al. (2018)
Residuos de glicerina	✓		Cadena et al. (2019)
Caña de azúcar	✓		Prasara-A et al. (2019)
Camarones frescos	✓	✓	Este libro.

Fuente: elaboración propia.

7.2. Investigaciones recientes de evaluaciones de impactos sociales de bioprocesos y biorrefinerías

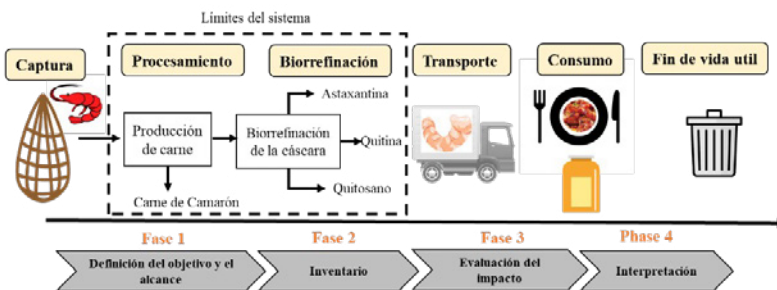
Trabajos recientes han mostrado un creciente interés por la herramienta s-LCA y su aplicación en diferentes sistemas como el manejo y tratamiento de aguas, la producción de biocombustibles, la construcción y el sector textil (Herrera & Corona, 2020; Opher et al., 2018). Para los enfoques de biorrefinería, se han utilizado las directrices del ciclo de vida social del PNUMA/SETAC en los últimos años (véase la tabla 7.2). Por ejemplo, Prasara et al. (2019) identificaron los puntos sociales clave en el desarrollo de una biorrefinería que produce alimentos, combustible y productos de fibra a partir de la caña de azúcar. Los autores descubrieron que el impacto de la quema de la basura de la caña era determinante en el desempeño social que afectaba a los trabajadores, los consumidores locales y la comunidad. Valente et al. (2018) emplearon la base de datos Social Hotspots (SHDB) dentro del s-LCA para seleccionar los problemas sociales más relevantes para una biorrefinería encargada de producir

bioetanol de segunda generación en dos lugares diferentes (Estados Unidos y Noruega). Cadena et al. (2019) analizaron un enfoque de biorrefinería para la valorización de residuos de glicerina situado en los Países Bajos a partir de la dimensión social. Los autores encontraron tres puntos calientes en las etapas del ciclo de vida, como son la facturación, la inversión en I+D y la libertad de asociación, que permitieron identificar posibles mejoras en el proceso para obtener mayores beneficios sociales. Costa et al. (2022) evaluaron el ciclo de vida social del sector de la celulosa y el papel portugués basado en el análisis de insumo-producto, la evaluación de riesgo social se hizo con la base de datos Social Hotspots, y los impactos positivos se determinaron teniendo en cuenta indicadores de empleo y remuneración. Tragnone et al. (2022) realizaron un análisis de ciclo de vida social en el sector agroalimentario. Debido a que s-LCA es una metodología en evolución, el análisis no pudo ser completo, debido a la falta de datos, delimitación del sistema, definición de criterios, entre otros.

7.3. Resultados

En la figura 7.1 se muestran las fases del desarrollo del análisis de ciclo de vida social aplicados para la biorrefinería de camarón.

Figura 7.1. Límites del sistema y fases aplicadas en el s-LCA



Fuente: elaboración propia.

Dada la necesidad de tener criterios de comparación para la toma de decisiones con base en los resultados de la evaluación de ciclo de vida social, se consideraron dos locaciones para el proyecto: el estudio base teniendo en cuenta la ubicación de la biorrefinería en la región Caribe colombiana, y una segunda ubicación en la costa pacífica colombiana. En la figura 7.2 se observan las ubicaciones geográficas seleccionadas.

Figura 7.2. Escenarios para el análisis de ciclo de vida social



Fuente: elaboración propia.

El objetivo de este estudio es evaluar los posibles beneficios sociales de la integración de una topología de biorrefinería de camarón dentro de las plantas convencionales de procesamiento de camarones para todas sus partes interesadas. La unidad funcional se estableció en una planta de biorrefinería con una capacidad de procesamiento de 469,22 kg/h de camarón fresco. Dado que el objetivo es la evaluación del diseño del proceso, la principal aplicación del s-LCA es a nivel organizativo (Cadena et al. 2019). Los límites del sistema incluyen la producción de carne y el procesamiento de los

residuos del camarón. Las etapas de cría, transporte y consumo en el ciclo de vida se excluyen de este análisis debido a las limitaciones de datos del sistema para enfoques emergentes en fase temprana de diseño. La comparación de los resultados entre los enfoques convencional y de biorrefinería, informa sobre la idoneidad de ambas alternativas para alcanzar los resultados sociales deseados.

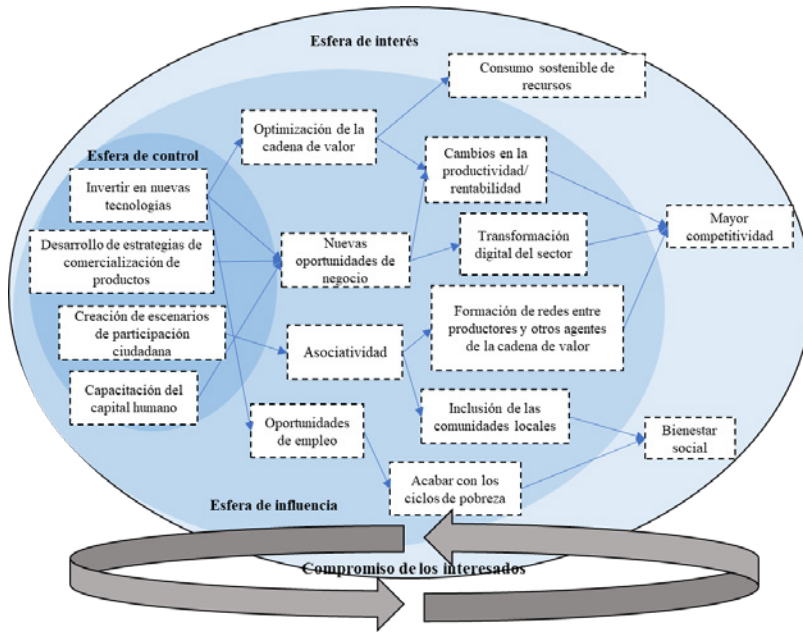
Para el s-LCA de la biorrefinería de camarón se seleccionan cuatro grupos de partes interesadas de acuerdo con los límites del proyecto establecidos y las categorías sugeridas en las directrices del PNUMA/SETAC (2009). El primer grupo corresponde a los trabajadores están dentro de las líneas de producción de procesamiento y biorrefinería de camarón. El segundo grupo es la comunidad local, representada por personas que viven en zonas cercanas a la biorrefinería. Los dos últimos grupos son la sociedad y los actores de la cadena de valor, especialmente las autoridades y los proveedores. Los consumidores y otros actores se excluyeron de este análisis porque la recopilación de datos en esta fase inicial sería difícil (Liu & Qian, 2019).

Las subcategorías y los indicadores de rendimiento para cada parte interesada se seleccionaron conforme a los resultados esperados. Para ello, se construye un esquema de teoría del cambio (Belcher, Davel & Claus, 2020) que representa las metas institucionales del Plan de Desarrollo del Departamento de Bolívar (Turabay & Contreras, 2019) y las estrategias establecidas por la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (2019). A partir de estos objetivos institucionales establecidos, se seleccionaron las subcategorías de la guía del PNUMA/SETAC más representativas. La recopilación de datos de los indicadores relacionados con la localización proviene de la revisión de documentos oficiales con información estadística (The World Bank - Open data, 2019) y del informe de responsabilidad corporativa de empresas camaroneras locales (Garavito, 2012).

La figura 7.3 muestra una representación esquemática del enfoque de la teoría del cambio derivada de los objetivos institucionales establecidos para las actividades acuícolas a nivel nacional y regional. Se identificaron tres resultados deseados para las industrias del camarón en Colombia, que abarcan aspectos técnicos, económicos y sociales. Se considera que los cambios técnicos en la cadena de valor (por ejemplo, la optimización de los procesos) aumentan la productividad o la rentabilidad y, en consecuencia, la competitividad. Estas metas institucionales prestan especial atención a mejorar la asociatividad para la interacción de los diferentes actores, particularmente, la comunidad y los productores. Las estrategias que promueven la participación ciudadana y los escenarios de transferencia de conocimiento se ubican dentro de la esfera de control para que las autoridades contribuyan al logro de dichas metas. Una topología de biorrefinería introducida dentro del procesamiento convencional del camarón representa una nueva oportunidad de negocio que podría conducir a cambios positivos en la rentabilidad del proceso, mientras se avanza hacia sistemas de producción más limpios. Varios programas de acuicultura en Colombia se han orientado hacia una producción eco-sostenible con cuatro factores clave: i) seguridad alimentaria, ii) bienestar animal, iii) desarrollo social y iv) sostenibilidad ambiental. Este proyecto podría ayudar a cumplir dichos objetivos, especialmente por la reducción en los residuos generados al procesar los caparazones de los camarones. Uno de los cambios más importantes que esperan las comunidades locales es el aumento de las oportunidades de empleo durante las fases de construcción y funcionamiento de la planta de biorrefinería. Como afirmó Zizzamia (2020), estos cambios en el mercado laboral son un poderoso determinante del bienestar, que puede medirse en términos de la situación de pobreza. Al invertir en este proyecto se espera un cambio a largo

plazo en los ciclos de pobreza, por mayores ingresos económicos a los hogares colombianos procedentes de los empleos locales.

Figura 7.3. Esquema de la teoría del cambio para la industria camaronera



Fuente: elaboración propia.

La tabla 7.3 resume las subcategorías seleccionadas para cada categoría de actores directos, con las que se miden los cambios sociales esperados cuando se realice esta intervención en ambos escenarios colombianos. La categoría de trabajadores incluye seis subcategorías relacionadas con las prácticas laborales y el trabajo decente. Dado que la formación era una de las estrategias clave en la teoría del cambio, se seleccionó como indicador la subcategoría de seguridad social/beneficios, tal y como informan Vidaurre et al. (2020). La subcategoría de seguridad y salud depende del funcionamiento del sistema y, en consecuencia, los datos de los procesos

emergentes podrían ser complejos de recopilar. Se consideraron los informes de seguridad laboral de los procesos convencionales como base para definir los resultados de las tasas de accidentes laborales. El índice de género se seleccionó como indicador principal porque mide el compromiso de una empresa para promover un entorno organizativo e inclusivo a través de prácticas de no discriminación en materia de género. Las partes interesadas de la comunidad local han identificado, mediante la aplicación de encuestas como las realizadas por Prasara & Gheewala (2018), que el empleo local es el aspecto más importante a cuantificar de una intervención. Esto también fue confirmado por los resultados de la teoría del cambio en lo que respecta a las nuevas oportunidades de empleo en zonas cercanas a las instalaciones. Los aspectos sociales relacionados a la inclusión de la comunidad local se abordaron en la subcategoría de compromiso con la comunidad. Esta última mide la responsabilidad de las empresas para fortalecer, mejorar y apoyar socialmente a las comunidades de la zona con el apoyo de fundaciones, la implementación de proyectos productivos, actividades de liderazgo ambiental y programas de salud, alimentación y educación de las familias. En la categoría de actores de la cadena de valor, se seleccionó el indicador de proveedores locales, porque informan sobre las oportunidades de generación de ingresos, a la vez que miden las redes potenciales de productores/proveedores dentro de la biorrefinería. En cuanto a los actores de la sociedad, se utilizaron como subcategorías el desarrollo tecnológico y la contribución al desarrollo económico. Los resultados de Cadena et al. (2019) sugirieron lo crucial, que es una alta inversión en investigación y desarrollo para fomentar la competitividad y la innovación en los sectores, por lo que se seleccionó como indicador para determinar los posibles cambios en la competitividad cuando se lleve a cabo el proyecto.

Tabla 7.3. Indicadores seleccionados para la *s-LCA* de la biorrefinería de camarón

Categoría de partes interesadas	Subcategorías	Indicador	Factor de ponderación	Fuente
Trabajadores	Salud y seguridad	Tasa de accidentes laborales	0,08	Tsalidis et al. (2020)
	Salario justo	Relación entre el salario medio del sector y el salario digno	0,06	Liu & Qian (2019)
	Jornada laboral	Hora de trabajo	0,04	Valente et al. (2018)
	Libertad de asociación y negociación colectiva	Número de comités sindicales y de otro tipo	0,05	Vidaurre et al. (2020)
	Igualdad de oportunidades	Proporción de género	0,08	Cadena et al. (2019)
	Prestaciones sociales/seguridad social	Número de días de vacaciones	0,04	Cadena et al. (2019)
Capacitación		0,05	Vidaurre et al. (2020)	
Comunidad local	Empleo local	Potencial de creación de empleo	0,13	Vidaurre et al. (2020)
	Compromiso con la comunidad	Inversiones con beneficio directo para la comunidad	0,09	Cadena et al. (2019)
	Condiciones de vida seguras y saludables	Pobreza multidimensional municipal	0,13	Balcázar et al. (2018)
Actores de la cadena de valor	Relación con los proveedores	Proveedores locales	0,05	Cadena et al. (2019)
Sociedad	Desarrollo tecnológico	Inversión en I&D	0,10	Cadena et al. (2019)
	Contribución al desarrollo económico	Participación del sector en el PIB departamental (%)	0,10	Este libro

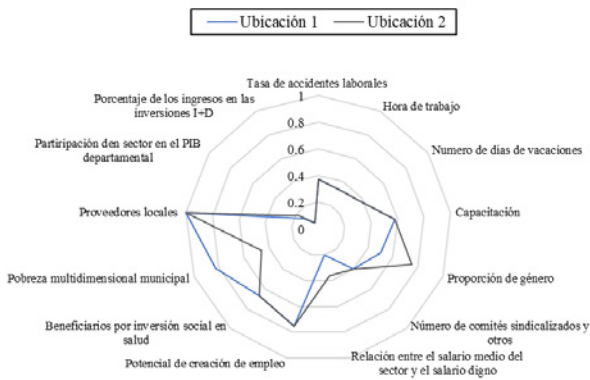
Fuente: elaboración propia.

La figura 7.4 muestra los puntajes normalizados para cada indicador social en las ubicaciones 1 y 2. La localidad de Tumaco mostró más indicadores cercanos a 1 que Cartagena de Indias, en particular, para los indicadores de relación de salarios dignos y sectoriales, participación del sector en el PIB del departamento y relación de género. Para el índice de pobreza multidimensional, Cartagena de Indias alcanzó un puntaje normalizado de 0,825, el cual es 1,8 veces más que Tumaco. Cuanto más cerca de 1, más favorables son los efectos de este sistema en el aumento del bienestar social. Los indicadores directamente relacionados con las políticas institucionales de la empresa o con el desempeño de los procesos, no cambiaron cuando se analizaron ambos lugares. El costo de la vida en Tumaco es inferior al de Cartagena de Indias, por lo que se esperaba una mayor relación entre los salarios del sector y los salarios dignos. A pesar de los impactos positivos que un proyecto de biorrefinería puede conllevar en Tumaco, todavía hay un largo camino por recorrer por la producción de cultivos ilícitos y la violencia que afecta a las comunidades locales. Debido al esfuerzo por compensar a las víctimas del conflicto armado en esta zona, se esperan más cambios en el bienestar social con esta intervención en Tumaco. La industria camaronera ha venido implementando iniciativas de inclusión social con mujeres víctimas del desplazamiento forzado, por ejemplo, la alianza entre Tumako Fish S.A.S. y la Asociación de Mujeres Semillas de Paz (Cárdenas, 2017). Estos programas sociales han permitido una mayor participación de las mujeres, especialmente de las madres cabeza de familia, y, en consecuencia, el indicador de proporción de género fue mayor para Tumaco. El potencial de creación de empleo tiene efectos significativos en el desarrollo económico de ambas locaciones, y en el bienestar de las comunidades; sin embargo, se pueden observar mayores impactos en la reconstrucción del bienestar social en las zonas más necesitadas y con mayores tasas de desempleo (Tumaco:

88 % (Naranjo, 2020), Cartagena: 18 % de la población (Figueroa-Alcazar, 2020).

Una de las principales oportunidades de mejora en el desempeño social de la biorrefinería de camarón está relacionada con las inversiones en I+D (con una puntuación normalizada $<0,5$), que están muy por debajo al de empresas más innovadoras de Colombia. La participación del sector en el producto interno bruto del país alcanzó una puntuación normalizada de 0,135 y 0,175 para Cartagena y Tumaco, respectivamente. A pesar del potencial de ambas locaciones para impulsar el desarrollo económico a través de las prácticas acuícolas (lo que conlleva a una mayor participación del sector en el PIB), la reactivación de la industria camaronera ha sido lenta en los últimos años, con muchos retos por abordar en términos de modernización y sostenibilidad.

Figura 7.4. Indicadores de desempeño social de la biorrefinería

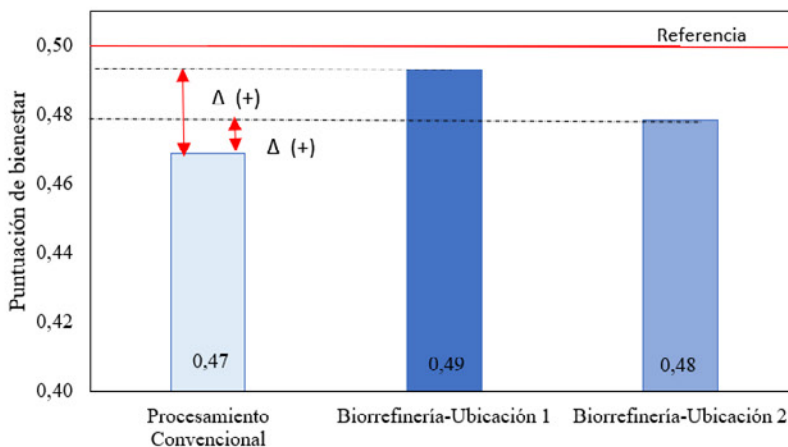


Fuente: elaboración propia.

La figura 7.5 muestra la puntuación global del desempeño social después de calcular los indicadores normalizados y ponderarlos. Los enfoques convencionales y de biorrefinería mostraron puntuaciones por debajo del punto de referencia, sin embargo, el proyecto ubicado

en Cartagena se acercó ligeramente al umbral de buen desempeño social. Los cambios en el empleo local y el compromiso con la comunidad contribuyeron significativamente al aumento en 4,26 %, que se observó cuando se incluyó el sistema de biorrefinería en la industria del camarón. Según estas puntuaciones, Cartagena de Indias es un lugar socialmente más adecuado para la planta de biorrefinería con cambios sociales positivos a lo largo de la intervención. Las condiciones de vida en términos de pobreza fueron clave en la selección, debido a la alta importancia relativa asignada a este indicador para medir el bienestar social. Las puntuaciones se compararon con otros resultados sociales disponibles en la literatura para los sectores de la energía, el agua y la construcción. La biorrefinería de camarón alcanzó una puntuación para el desempeño social más alta que para el caso de estudio del puente de hormigón, sin embargo, estaba dentro del rango 0,40-0,50 observado para diferentes resultados sociales como el perfil corporativo y el nivel de desempeño, que se midieron a través de los mismos métodos agregativos.

Figura 7.5. Resultados sociales de la biorrefinería de camarón en las ubicaciones 1 y 2

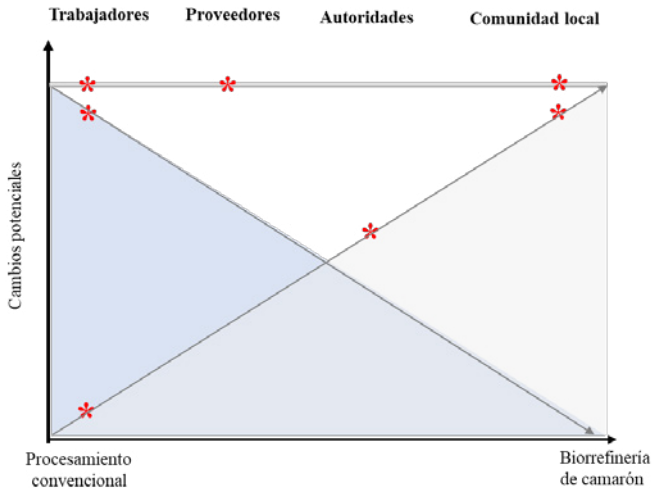


Fuente: elaboración propia.

Las estimaciones de estas puntuaciones permitieron identificar los posibles cambios sociales que afectan a las partes interesadas cuando la intervención avanza hacia un consumo más sostenible del camarón, mediante estrategias de valorización de residuos como los caparazones de camarón. El ligero aumento en la puntuación del desempeño social proporcionó información sobre las tendencias futuras de los beneficios sociales de la biorrefinería en el contexto colombiano. Dichas tendencias se muestran en la figura 7.6. Para la comunidad local se identificaron cambios positivos y neutros como tendencia en el desempeño de la biorrefinería, debido al aumento de las ofertas de trabajo y a las familias beneficiadas por las iniciativas sociales de la empresa. Para las autoridades solo se identificaron cambios positivos, debido al aumento esperado de las contribuciones de este sector al PIB del departamento de Bolívar, cuando se logra una mayor competitividad de las empresas. La categoría de proveedores reporta cambios neutrales ya que el sistema de procesamiento convencional está comprometido con la priorización de proveedores locales, y se espera que estos esfuerzos continúen en la biorrefinería. La categoría de trabajadores mostró diferentes tendencias en el potencial de cambio social, principalmente para las subcategorías de salud, seguridad e igualdad de oportunidades. Se espera un ligero aumento del indicador de la tasa de accidentes laborales debido a la adición de unidades inherentemente peligrosas como el reactor de desacetilación, y el uso de sustancias volátiles en el aislamiento de productos de alto valor dentro del sistema de biorrefinería (Moreno-Sader et al., 2020). Las condiciones de trabajo, como las horas de trabajo y los días de vacaciones, se mantuvieron sin cambios, obedeciendo a la normatividad laboral y de empleo en Colombia. Se prevén cambios positivos en la métrica de la proporción de género debido a las políticas de varias empresas camaroneras que promueven entornos de

inclusión, especialmente en Tumaco, donde la participación de las mujeres está aumentando.

Figura 7.6. Tendencias de los posibles cambios sociales para el sistema de biorrefinería de residuos de camarones

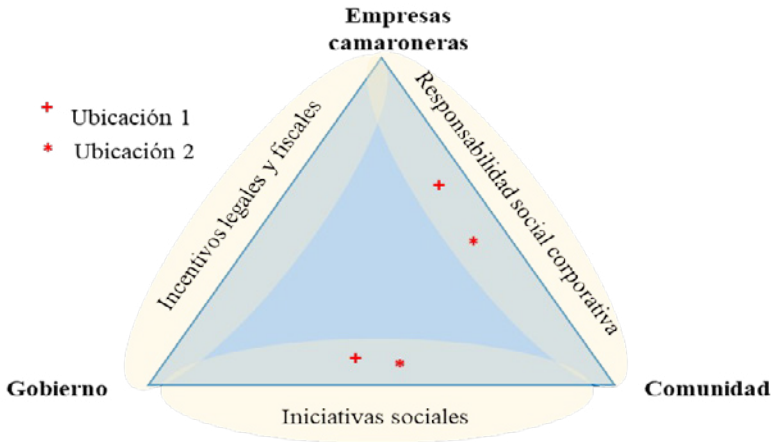


Fuente: elaboración propia.

La figura 7.7 muestra las sinergias entre las partes interesadas del subsector del camarón en Colombia. Las empresas camaroneras han demostrado un fuerte valor de responsabilidad social a través de iniciativas que mejoran las condiciones de vida de las comunidades locales. En los últimos años, estas empresas han reclamado una mayor participación de las autoridades gubernamentales en la reactivación de la economía camaronera con incentivos legales y fiscales. Además, la atracción de inversores en Tumaco tiene varios retos que requieren más interacciones sinérgicas entre todas las partes interesadas (Cárdenas, 2017). Se identificaron necesidades especiales en el apoyo del gobierno a las empresas camaroneras

para el desarrollo de productos de comercialización más diversos con potencial de exportación (ejemplo: incentivos a la innovación).

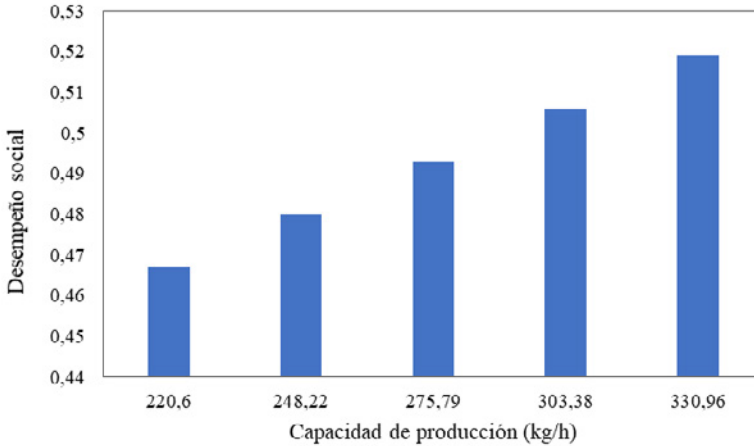
Figura 7.7. Sinergias entre las partes interesadas para el procesamiento del camarón



Fuente: elaboración propia.

En la figura 7.8 se muestra el efecto de la capacidad de producción en el desempeño social de la biorrefinería ubicada en Cartagena de Indias. Para ello se evaluó la relación de la capacidad de producción con el potencial de generación de empleo, y se calcularon los valores normalizados para este indicador social. El puntaje de desempeño social global fue calculado para las diferentes capacidades de producción. Se evidencia cómo la capacidad de producción es directamente proporcional a la generación de empleo. Cuando el sistema opera a una capacidad de producción del 303,38 y 330,96 kg/h, el puntaje de desempeño social alcanza valores deseados (superiores al límite aceptable de 0,5).

Figura 7.8. Efecto de la capacidad de producción en el desempeño de los indicadores sociales de la biorrefinería



Fuente: elaboración propia.

7.4. Conclusiones

La incorporación de estrategias de economía circular en las industrias camaroneras colombianas representa una alternativa atractiva para aumentar la competitividad del sector y contribuir al desarrollo económico y social de las regiones. Este estudio proporciona datos cuantitativos sobre el desempeño social de un enfoque de biorrefinería de camarón cuando se consideran dos ubicaciones diferentes (Cartagena de Indias en la costa Caribe y Tumaco en la costa Pacífica). El análisis combinado del s-LCA y de la teoría del cambio revela una puntuación de desempeño social más alta para Cartagena que para Tumaco, con un 0,49 cercano al valor de referencia de 0,5. Se identifican cambios positivos en la valorización de los caparazones de camarón, especialmente para la comunidad

local. La biorrefinería propuesta demuestra estar en armonía con los cambios sociales esperados para la industria del camarón conforme a los resultados del análisis de la teoría del cambio.

Referencias

- Aristizábal-Marulanda, V., Solarte-Toro, J. & Cardona-Alzate, C. (2020). Economic and social assessment of biorefineries: The case of Coffee Cut- Stems (CCS) in Colombia. *Bioresource Technology Reports*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100397>.
- Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca. (2019). *Plan Estratégico Institucional*. <https://www.aunap.gov.co/documentos/pei-v1-aunap.pdf>.
- Balcázar, C., Malásquez, E., Olivieri, S. & Pico, J. (2018). *Spatial Heterogeneity and Household Life Cycle in the Multidimensional Poverty Index: The Case of Colombia*. World Bank Group.
- Belcher, B., Davel, R. & Claus, R. (2020). A refined method for theory-based evaluation of the societal impacts of research. *MethodsX*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100788>.
- Cadena, E., Rocca, F., Gutiérrez, J. & Carvalho, A. (2019). Social life cycle assessment methodology for evaluating production process design: Biorefinery case study. *Journal of Cleaner Productio*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117718>.
- Cárdenas, S. (2017). Tumako Fish y las guerreras del camarón. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/politica/proceso-de-paz/tumako-fish-y-las-guerreras-del-camaron-89418>.
- Chang, Y., Neugebauer, S., Lehmann, A., Scheumann, R. & Finkbeiner, M. (2017). Life Cycle Sustainability Assessment Approaches for Manufacturing. In *Sustainable Manufacturing* (pp. 221–237). Springer Open.

- Costa, D., Quintero, P., Pereira, V. & Claudia, A. (2022). Social life cycle assessment based on input-output analysis of the Portuguese pulp and paper sector. *Journal of Cleaner Production*, 330. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129851>.
- Figueroa-Alcazar, H. (2020). Conozca de qué sectores son los cesantes en Cartagena. *El Universal*. <https://www.eluniversal.com.co/economica/tasa-de-desempleo-en-cartagena-181-FE3732575>.
- Franze, J. & Ciroth, A. (2011). A comparison of cut roses from Ecuador and the Netherlands. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, 366–379. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0266-x>.
- Garavito, J. (2012). *Informe de responsabilidad corporativa Océanos*. Editorial.
- García-Sánchez, M. & Güereca, L.P. (2019). Environmental and social life cycle assessment of urban water systems: The case of Mexico City. *Science of The Total Environment*, 693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.270>.
- Ghate, D. (2018). Developing theories of change for social programmes: co-producing evidence-supported quality improvement. *Palgrave Communications*, 4. <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0139-z>.
- Gnansounou, E. (2017). Fundamentals of Life Cycle Assessment and Specificity of Biorefineries. In E. Gnansounou & A. Pandey. (Ed.), *Life-Cycle Assessment of Biorefineries* (pp. 41-75). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63585-3.00002-4>.
- Herrera, A. & Corona, B. (2020). Using Social Life Cycle Assessment to analyze the contribution of products to the Sustainable Development Goals: a case study in the textile sector. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 1833–1845. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01789-7>.
- Huertas-Valdivia, I., Ferrari, A., Settembre-Blundo, D. & García-Muiña, F. (2020). Social life-cycle assessment: A review by bibliometric analysis. *Sustain*. 12, 1–25. <https://doi.org/10.3390/su12156211>.

- Krause, G., Suzannah, B., Dennis, J., Grant, J., Fanning, L., Filgueira, R., Miller, M., Pérez, J., Stybel, N., Stead, S. & Wawrzynski, W. (2020). Visualizing the social in aquaculture: How social dimension components illustrate the effects of aquaculture across geographic scales. *Marine Policy*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103985>.
- Liu, S. & Qian, S. (2019). Evaluation of social life-cycle performance of buildings: Theoretical framework and impact assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 213, 792–807. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.200>.
- Makuwira, J. (2016). Chapter 15 - The nongovernmental development sector and impact assessment. In V. Jakupec & M. Kelly. (Ed.), *Assess. Impact Foreign Aid. Value Money Aid Trade* (pp. 215–226). Elsevier.
- Moreno-Sader, K., Martínez-Consuegra, J. & González-Delgado, Á. (2020). Assessing the Exergetic and Inherent Safety Performance of a Shrimp-Based Biorefinery via Computer-Aided Tools. *Energies*, 13. <https://doi.org/10.3390/en13246688>.
- Naranjo, J. (2020). El Pacífico lleva años con desempleo de pandemia. *Semana Rural*. <https://semanarural.com/web/articulo/el-pacifico-lleva-anos-con-desempleo-de-pandemia/1503>.
- Navarro, I., Yepes, V. & Martí, J. V. (2018). Social life cycle assessment of concrete bridge decks exposed to aggressive environments. *Environmental Impact Assessment Review*, 72, 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.05.003>.
- Opher, T., Shapira, A. & Friedler, E. (2018). A comparative social life cycle assessment of urban domestic water reuse alternatives. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23, 1315–1330. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1356-1>.
- Prasara-A, J. & Gheewala, S. (2018). Applying Social Life Cycle Assessment in the Thai Sugar Industry: Challenges from the field. *Journal of Cleaner Production*, 172, 335–346. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.120>.

- Prasara-A, J., Gheewala, S., Silalertruksa, T., Pongpat, P. & Sawaengsak, W. (2019). Environmental and social life cycle assessment to enhance sustainability of sugarcane-based products in Thailand. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 1447–1458. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01715-y>.
- The World Bank - Open data. (2019). *World Health*.
- Tokede, O. & Traverso, M. (2020). Implementing the guidelines for social life cycle assessment: past, present, and future. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 1910–1929. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01814-9>.
- Tokede, O. & Traverso, M. (2022). What are the challenges in assessing circular economy for the built environment? A literature review on integrating LCA, LCC and S-LCA in life cycle sustainability assessment, LCSA. *Journal of Building Engineering*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104203>.
- Tragnone, B., D'Eusano, M. & Petti, L. (2022). The count of what counts in the agri-food Social Life Cycle Assessment. *Journal of Cleaner Production*, 354. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131624>
- Tsalidis, G., Gallart, J., Corberá, J., Blanco, F., Harris, S. & Korevaar, G. (2020). Social life cycle assessment of brine treatment and recovery technology: A social hotspot and site-specific evaluation. *Sustainable Production and Consumption*, 22, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.02.003>.
- Tsalis, T., Avramidou, A. & Nikolaou, I. (2017). A social LCA framework to assess the corporate social profile of companies: Insights from a case study. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1665–1676. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.003>.
- Turbay, D. & Contreras, D. (2019). *Plan Departamental de Extension Agropecuaria*. Gobernación de Bolívar. <https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/Documents/PDEA%27s%20Aprobados/PDEA%20Bol%C3%ADvar.pdf>

- UNEP/SETAC. (2009). *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*.
- Valente, C., Brekke, A. & Modahl, I. (2018). Testing environmental and social indicators for biorefineries: bioethanol and biochemical production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23, 581–596. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1331-x>.
- Vidaurre, N., Vargas-Carpintero, R., Wagner, M. & Lask, J. (2020). Lewandowski, I. Social aspects in the assessment of biobased value chains. *Sustainability*, 12(23, 1–27. <https://doi.org/10.3390/su12239843>.
- Zira, S., Rööös, E., Ivarsson, E., Hoffmann, R. & Rydhmer, L. (2020). Social life cycle assessment of Swedish organic and conventional pork production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 1957–1975. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01811-y>.
- Zizzamia, R. (2020). Is employment a panacea for poverty? A mixed-methods investigation of employment decisions in South Africa. *World Development*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104938>.



Capítulo VIII.

Aplicación de la métrica del retorno de la inversión por seguridad y sostenibilidad a una biorrefinería de camarón

La sostenibilidad se ocupa de una integración equilibrada del desempeño social, ambiental y económico de los diferentes actores sociales y sus quehaceres dentro de la sociedad, así como del balance entre ambiente y crecimiento económico en beneficio de las generaciones actuales y futuras (Geissdoerfer et al., 2017). A través del desarrollo sostenible se busca satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras (Sánchez-Carracedo et al., 2021). La sostenibilidad es un tema que incluye a todos los sectores; por lo tanto, para poner en práctica la esencia de la sostenibilidad, en septiembre de 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU) lanzó la *Agenda 2030* para el desarrollo sostenible, y ha hecho el llamado a todos los gobiernos y empresas privadas para que apoyen el logro de cada uno de estos objetivos (van der Waal & Thijssens, 2020).

Los enfoques de biorrefinería se han venido diseñando teniendo en cuenta métricas económicas, ambientales y sociales que dan cuenta del desempeño sostenible del sistema (Aristizábal-Marulanda et al., 2020). En la literatura, existen diferentes propuestas de metodologías e indicadores para evaluar la sostenibilidad de procesos químicos. Sin embargo, la aplicación de un indicador

ponderado para la evaluación simultánea de proyectos y alternativas ha suscitado recientemente el interés de académicos e investigadores a nivel mundial. Guillen-Cuevas et al. (2018) presentaron la métrica ponderada del retorno de la inversión por seguridad y sostenibilidad (SASWROIM), la cual se basa en el retorno económico convencional de la inversión (ROI) e incorpora indicadores de seguridad y sostenibilidad. Esta métrica utiliza la normalización de índices técnicos y factores de ponderación para generar un único indicador que permite conocer el comportamiento sostenible del proceso y la selección directa de las alternativas evaluadas (Meramo-Hurtado et al., 2020), además, puede emplearse durante la etapa de diseño conceptual.

8.1. Métrica ponderada del retorno de la inversión por seguridad y sostenibilidad (SASWROIM)

El retorno económico de un proyecto base se calcula por la ecuación 8.1.

$$ROI_{Base} = \frac{AEP_{Base}}{TCI_{Base}} \quad (8.1)$$

Donde AEP_{Base} y TCI_{Base} son el beneficio económico anual y la inversión total de capital del diseño del caso base. Se consideran un conjunto de indicadores de sostenibilidad y seguridad $\{i | i = 1, 2, \dots, N \text{ indicadores}\}$. Los valores de estos indicadores, para el caso base, se definen como $Indicator_{Base}$ y los valores objetivos asociados se designan como $Indicator_{Target}$. Los valores objetivos se determinan mediante técnicas de evaluación comparativa, objetivos deseados de la empresa (estratégicos u operativos) o las mejores prácticas alcanzables. Las diferentes alternativas de diseño como resultado

de actividades de síntesis, análisis e ingeniería de procesos cuentan con diferentes valores para esos indicadores. Cada una de las alternativas de diseño se representa con un índice p con $p = 1, 2, \dots, N$ proyectos. Para el p^{th} proyecto, se tiene un término asociado con el beneficio anual de seguridad y sostenibilidad (ASSP) (Meramo-Hurtado et al., 2020) como indica la ecuación 8.2.

$$ASSP_p = AEP \left[1 + \sum_{i=1}^{N_{\text{indicators}}} w_i \left(\frac{\text{Indicator}_{\text{base},i} - \text{Indicator}_{p,i}}{\text{Indicator}_{\text{base},i} - \text{Indicator}_{\text{Target},i}} \right) \right] \quad (8.2)$$

Donde W_i es un factor de ponderación que representa la importancia relativa del indicador de seguridad o sostenibilidad comparado con el beneficio económico anual. $\text{Indicator}_{p,i}$ es el valor del indicador i^{th} de seguridad o sostenibilidad asociado al p^{th} diseño. El denominador $\text{Indicator}_{\text{base},i} - \text{Indicator}_{\text{Target},i}$ representa la máxima mejora deseada en el indicador i^{th} . El numerador $\text{Indicator}_{\text{base},i} - \text{Indicator}_{p,i}$ es la mejora (cuando la diferencia es positiva) o el deterioro (cuando la diferencia es negativa) asociada a la opción de diseño p^{th} . Por lo tanto, el cociente $\left(\frac{\text{Indicator}_{\text{base},i} - \text{Indicator}_{p,i}}{\text{Indicator}_{\text{base},i} - \text{Indicator}_{\text{Target},i}} \right)$ representa la contribución fraccional de la opción de diseño p^{th} para alcanzar el objetivo del rendimiento asociado con la métrica i^{th} de seguridad o sostenibilidad. El término $ASSP_p$ es una forma generalizada para la cuantificación del beneficio global, que incluye la forma tradicional de beneficio económico, así como los posibles beneficios de seguridad y sostenibilidad del proyecto. Este beneficio generalizado se ve reforzado cuando hay una mejora en la seguridad o sostenibilidad en comparación con el diseño del caso base (Meramo-Hurtado et al., 2020).

El rendimiento ponderado del retorno de la inversión por seguridad y sostenibilidad (SASWROIM) del diseño se expresa como indican las ecuaciones 8.3 y 8.4.

$$\text{SASWROIM}_P = \frac{\text{ASSP}_P}{\text{TCI}_P} \quad (8.3)$$

$$\text{SASWROIM} = \frac{\text{AEP}}{\text{TCI}} \left[1 + \sum_{i=1}^{N_{\text{Indicators}}} w_i \left(\frac{\text{Indicator}_{\text{base},i} - \text{Indicator}_{\text{project},i}}{\text{Indicator}_{\text{base},i} - \text{Indicator}_{\text{Target},i}} \right) \right] \quad (8.4)$$

SASWROIM proporciona una base económica para el costo/valor real de un proyecto basado en el rendimiento financiero directamente tangible, así como el impacto indirectamente tangible en el ambiente y la seguridad, utilizando el rendimiento de la inversión como base unificadora de los múltiples objetivos. La mejora de los indicadores de seguridad o sostenibilidad de un diseño propuesto conduce a una mejora de SASWROIM. De lo contrario, un proyecto que conduzca al deterioro de los indicadores de seguridad o sostenibilidad hace que el valor de SASWROIM disminuya. El valor de SASWROIM se compara entonces con el mínimo aceptable (o umbral) aceptable para un proyecto. En consecuencia, un proyecto con un ROI atractivo pero un SASWROIM bajo no debería ser seleccionado. En cambio, un proyecto con un rendimiento superior en materia de sostenibilidad y seguridad puede hacer que el valor de SASWROIM supere el ROI convencional, y sea justificable su inversión (Meramo-Hurtado et al., 2020).

8.2. Investigaciones recientes de evaluaciones de sostenibilidad de bioprocesos y biorrefinerías

En la literatura se encuentran diferentes contribuciones dirigidas al análisis de sostenibilidad de procesos industriales. Sánchez-Tuiran et al. (2020) evaluaron una biorrefinería lignocelulósica de múltiples materias primas empleando la métrica ponderada del retorno sostenible (SWROIM). El análisis incluyó aspectos económicos,

exergéticos, ambientales y de seguridad. Los resultados mostraron que la topología alcanzó un SWROIM de 27,29 % superior al ROI con un comportamiento sostenible del proceso. Esta misma metodología fue aplicada nuevamente por Meramo-Hurtado et al. (2020) para comparar dos rutas de producción de biobutanol incluyendo siete indicadores técnicos (retorno de la inversión, período de recuperación de la inversión, potencial de calentamiento global, índice de materiales renovables, índice de seguridad inherente, eficiencia exergética y exergía de residuos). Los resultados revelaron que la segunda topología brinda un diseño más sostenible bajo las condiciones evaluadas. Por su parte, Yang et al. (2014) evaluaron un proceso Fischer-Tropsch de carbón/biomasa para la producción de combustible utilizando un conjunto multidimensional de métricas que tienen en cuenta aspectos económicos, medioambientales y sociales. Moreno-Sader et al. (2019) abordaron un enfoque integrado de evaluación incorporando la confiabilidad y la resiliencia a través de la métrica del retorno de la inversión, así, introdujo la métrica de seguridad, la sostenibilidad, la confiabilidad y la resiliencia ponderada de la inversión (S2R2WROIM). Por otro lado, Al-Sobbi & Alnousse (2018) evaluaron la aplicación de nuevas métricas de sostenibilidad en diferentes configuraciones para la recuperación de gas natural licuado, la métrica usada corresponde al SWROIM, donde se tuvieron en cuenta diferentes configuraciones, de las cuales, dos mejoraron en el análisis SWROIM entre 42 % y 47 %. González-Delgado et al. (2021) evaluaron la sostenibilidad y seguridad inherente de un proceso de producción de aceite de palma ubicado al norte de Colombia, para este proceso se obtuvo un SWROIM de 53 %, se alcanzó un valor más alto en comparación con el ROI convencional, esto permite concluir que la sostenibilidad tiene impactos positivos.

8.3. Resultados

El cálculo del retorno sostenible de la topología de la biorrefinería de camarón se realiza empleando la métrica ponderada del retorno sostenible de la inversión por seguridad y sostenibilidad (SASWROIM). Los indicadores socioambientales consideran una combinación de impactos por las emisiones atmosféricas y los efectos toxicológicos sobre las personas y los ecosistemas. Adicionalmente, se usa el puntaje de desempeño social como indicador del aspecto social. Mientras que la economía del proceso se evalúa mediante la métrica de la inversión total de capital (TCI), los beneficios económicos anuales (AEP), el retorno de la inversión (ROI) y el valor presente neto (VPN).

El desempeño económico y ambiental de la topología de camarón se presentó en los capítulos 3 y 4, respectivamente. En La tabla 8.1 se resumen los indicadores de sostenibilidad y seguridad considerados para el sistema bajo diferentes capacidades de producción de la planta. Los valores objetivos para los impactos toxicológicos y atmosféricos de salida se definen de acuerdo con los PEI reportados para la producción de quitosano a gran escala ($9,05E+03$ PEI/h, $1,34E+04$ PEI/h) divididos por 1387,21 kg de quitosano (Al-Sobbi & Alnouess, 2018). Una vez calculados los PEI por kg de producto ($6,52E+00$ y $9,67E+00$ PEI/kg), se multiplican por el caudal de quitosano en la biorrefinería. Para la métrica social, el valor objetivo se situó por encima del límite aceptable de 0,5 definido en el capítulo anterior. El objetivo de la métrica de reducción de residuos se obtiene asumiendo que el total de los residuos de camarones (cabeza, caparazón y camarones dañados) pueden ser recuperados. El proyecto base supone una disponibilidad de camarones frescos de 4.110 t/año, lo que lleva a alcanzar un ROI del 13,53 %. Se utiliza un valor umbral mínimo del 10 % para la empresa de camarones

siguiendo el trabajo realizado por Guillen-Cuevas et al. (2018) para un sistema de producción de butadieno. En este sentido, el enfoque de la biorrefinería está por encima del mínimo, proporcionando beneficios económicos en relación con el costo de la inversión. La métrica del ROI calculada por Cogollo-Herrera et al. (2018) para el quitosano de camarón fue del 18,08 % sin considerar las inversiones asociadas a la recuperación de astaxantina y la producción de carne. Se observa un aumento de la métrica de sostenibilidad a medida que aumenta la disponibilidad de materia prima y, proporcionalmente, la capacidad de producción de carne de camarón. Esta topología de biorrefinería deja de ser rentable cuando no hay suficiente materia prima para producir más de 248,22 kg de carne/h.

Tabla 8.1. Métricas socio-ambientales y económicas para diferentes escenarios

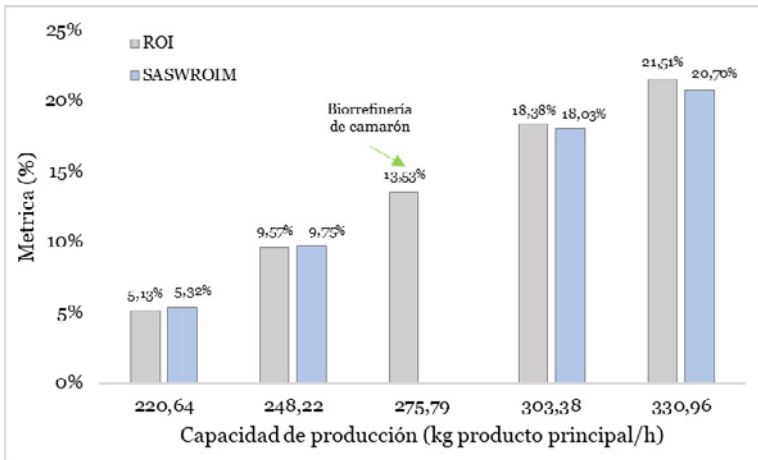
Materia prima (t/año)	Capacidad de producción (kg/h)	ROI (%)	VPN (\$MM USD)	Impactos toxicológicos de salida (PEI/h)	Impactos atmosféricos de salida (PEI/h)	Reducción de residuos (kg/h)	Puntuación desempeño social
Wi				0,3	0,3	0,4	0,2
Targets				1,76E+01	2,61E+01	191,43	0,6
0,8	220,64	5,13	-1,74	5,19E+01	6,63E+01	39,22	0,47
0,9	248,22	9,57	-0,25	5,84E+01	7,46E+01	44,11	0,48
1	275,79	13,53	1,12	6,48E+01	8,29E+01	49,02	0,49
1,1	303,38	18,38	2,82	7,13E+01	9,12E+01	53,90	0,50
1,2	330,96	21,51	3,86	7,78E+01	9,95E+01	58,82	0,52

Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la figura 8.1, el proyecto es más rentable al aumentar la capacidad de producción. Se halla una métrica de ROI por encima del umbral mínimo para 275,79, 303,38 y 330,96 kg de carne/h. Sin embargo, el SASWROIM fue inferior al ROI convencional para estos escenarios, lo que sugiere que el proyecto base

es más sostenible. La métrica ampliada supera el valor umbral del 10 % cuando la capacidad está por encima del diseño, lo que revela buenos impactos indirectamente tangibles en los aspectos socioambientales. Se encuentran rangos similares para el ROI extendido al analizar otros sistemas, por ejemplo, Moreno-Sader et al. (2019) lograron ROI basados en la sostenibilidad, en el rango de 24,46 % y 38,12 % para un sistema de compresores. Guillen-Cuevas et al. (2018) informaron de valores de SASWROIM en torno al 6-16 % e identificaron regiones en las que las métricas de sostenibilidad están equilibradas. A pesar de la reducción de los beneficios al incluir las métricas de sostenibilidad en la economía de la biorrefinería a mayores capacidades, esta topología sigue siendo atractiva cuando se asegura la disponibilidad de materia prima mayores o iguales a 4.534 t/año.

Figura 8.1. Efecto de la capacidad de la planta en la métrica del ROI basada en la sostenibilidad



Fuente: elaboración propia.

8.4. Conclusiones

La sostenibilidad para la topología de biorrefinería de camarón se evalúa considerando aspectos socioambientales y económicos. Los resultados revelan que el proyecto aumenta su retorno sostenible al aumentar la capacidad de producción. El SASWROIM fue inferior al ROI para los escenarios estudiados (275,79, 303,38 y 330,96 kg de carne/h), lo que da cuenta sobre el desvío de los indicadores de sostenibilidad y seguridad del desempeño deseado, y su repercusión en términos económicos. Sin embargo, la topología sigue siendo atractiva cuando se asegura la disponibilidad de materia prima mayor o igual a 4.534 t/año.

Referencias

- Al-Sobbi, S. & Alnouess, A. (2018). Applying New Sustainability Metric in Different Natural Gas Liquid (NGL) Recovery Configurations to Extend Investment Decision and Incorporate Sustainability Analysis. *Computer Aided Chemical Engineering*, 43(24), 145-150. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64235-6.50027-9>.
- Aristizábal-Marulanda, V., Solarte-Toro, J. & Cardona-Alzate, C. (2020). Economic and social assessment of biorefineries: The case of Coffee Cut-Stems (CCS) in Colombia. *Bioresource Technology Reports*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100397>.
- Cogollo-Herrera, K., Bonfante-Álvarez, H., De Ávila-Montiel, G., Barros, A. & González-Delgado, Á. (2018). Techno-economic sensitivity analysis of large scale chitosan production process from shrimp shell wastes. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 2179-2184. <https://doi.org/10.3303/CET1870364>.

- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. & Hultink, E. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.
- González-Delgado, Á., Barajas-Solano, A. & León-Pulido, J. (2021). Evaluación de la sostenibilidad y la seguridad inherente de un proceso de producción de aceite de palma en el norte de Colombia (Trad. C. Arenas). *Palmas*, 42(4), 33-49.
- Guillen-Cuevas, K., Ortiz-Espinoza, A., Ozinan, E., Jiménez-Gutiérrez, A., Kazantzis, N. & El-Halwagi, M. (2018). Incorporation of Safety and Sustainability in Conceptual Design via a Return on Investment Metric. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(1), 1411–1416. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03802>.
- Meramo-Hurtado, S., Alarcón-Suesca, C. & González-Delgado, Á. (2020). Exergetic sensibility analysis and environmental evaluation of chitosan production from shrimp exoskeleton in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119285>.
- Meramo-Hurtado, S., Gonza, A., Rehmman, L., Quin, E. & Mehrvar, M. (2020). Comparison of Biobutanol Production Pathways via Acetone – Butanol – Ethanol Fermentation Using a Sustainability Exergy-Based Metric. *ACS Omega*, 5(30), 18710–18730. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01656>.
- Moreno-Sader, K., Jain, P., Tenorio, L., Mannan, M. & El-Halwagi, M. (2019). Integrated Approach of Safety, Sustainability, Reliability, and Resilience Analysis via a Return on Investment Metric. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(24), 19522–19536. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b04608>.
- Sánchez-Carracedo, F., Sureda, B., Moreno-Pino, F. & Romero-Portillo, D. (2021). Education for Sustainable Development in Spanish

- Engineering Degrees. Case study. *Journal of Cleaner Production*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126322>.
- Sánchez-Tuiran, E., Meramo-Hurtado, S., Ponce-Ortega, J., El-Halwagi, M. & Ojeda-Delgado, K. (2020). Synthesis and Sustainability Evaluation of a Lignocellulosic Multifeedstock Biorefinery Considering Technical Performance Indicators. *ACS Omega*, 5(16), 9259–9275. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00114>.
- van der Waal, J. & Thijssens, T. (2020). Corporate involvement in Sustainable Development Goals: Exploring the territory. *Journal of Cleaner Production*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119625>.
- Yang, S., Xiao, L., Yang, S., Kraslawski, A., Man, Y. & Qian, Y. (2014). Sustainability assessment of the coal/biomass to fischer-tropsch fuel processes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2(1), 80–87. <https://doi.org/10.1021/sc400336e>.



Capítulo IX.

Conclusiones generales

El enfoque abordado en este libro que tiene como pilares el desarrollo topológico de biorrefinerías mediante modelado y simulación de procesos, el análisis de la topología desarrollada bajo criterios individuales que contribuyen a la sostenibilidad del mismo, y la obtención cuantitativa de la sostenibilidad del proceso con base en indicadores derivados de las evaluaciones individuales, permitió el desarrollo, análisis y evaluación de una topología sostenible de aprovechamiento integral del camarón en la región Caribe colombiana, mostrando que puede ser extrapolable para el desarrollos de otras topologías relacionadas con cadenas productivas priorizadas en otras regiones o países.

Se simula por primera vez una topología de aprovechamiento integral de camarón bajo el concepto de biorrefinería, aplicado a la región Caribe colombiana. La topología propuesta incluye cuatro secciones: i) procesamiento de camarones, ii) recuperación de quitina, iii) producción de quitosano, iv) recuperación de astaxantina. La capacidad de procesamiento anual de camarones frescos se fija en 4.110 toneladas, para una producción de 275,79 kg/h de carne, 3,33 kg/h de quitina, 2,7 kg/h de quitosano y 0,11 kg/h de astaxantina. Las eficiencias técnicas más altas de la biorrefinería

se registran en las secciones i y iv (92,89 % y 91,92 %, respectivamente), mientras que el mayor rendimiento de producción (587,8 g de producto/kg de camarón fresco) se alcanza en la sección de procesamiento de camarones.

La topología describe indicadores económicos aceptables como un valor presente neto de 3,76 MM USD y una tasa interna de retorno de 23,6 %. Sin embargo, el costo de la materia prima representa una variable crítica para este proceso, ya que solo tolera incrementos de 260 USD en los precios promedio de la materia prima antes de que el proceso deje de ser rentable. Para aumentar la rentabilidad de la biorrefinería se recomienda principalmente situar el precio medio de venta de los productos entre 12.500 USD/t y 13.500 USD/t.

La biorrefinería de camarón genera PEI negativos, lo que indica que el proceso es amigable con el ambiente, ya que ocurre una transformación de materias primas y residuos de alto potencial de impacto ambiental en productos finales de menor potencial de impacto ambiental. Además, la tasa de salida total de PEI fue menor a 1 para los casos estudiados, lo que sugiere un buen desempeño del proceso desde el punto de vista socioambiental. La categoría de impactos atmosféricos contribuye mayormente a la emisión de PEI debido a la presencia de componentes orgánicos volátiles (etanol y acetona) que salen del sistema a través de corrientes residuales.

Por su parte, la eficiencia exergética de la topología es del 25,61 %. Las etapas de descabezado y clasificación alcanzan las mayores irreversibilidades dentro del proceso con contribuciones del 98,315 % y 1,653 % del total de la exergía destruida, respectivamente. Las irreversibilidades en estas etapas se deben a la exergía por residuos. Mientras que las mayores pérdidas de exergía se hallan en las etapas de desacetilación, lavado de camarones frescos y desproteización.

Desde el punto de vista de seguridad inherente, la biorrefinería de camarón muestra un buen desempeño, con un índice total de seguridad inherente igual a 21. Los principales riesgos están dados por los subíndices de reactividad química y sustancia peligrosa. La reacción de desacetilación resulta ser muy riesgosa al ser altamente exotérmica, mientras que la acetona es la sustancia más peligrosa por su naturaleza altamente inflamable y tóxica. La temperatura, presión e inventario no representan riesgos para la etapa de operación.

La valorización de los residuos del camarón genera cambios sociales positivos, especialmente para las partes interesadas de la comunidad local. La ubicación potencial de la planta en la costa del Caribe colombiana mostró un puntaje de desempeño social de 0,49, cercano al umbral deseable de 0,5. El incremento en un 4.26 % de este puntaje con respecto al procesamiento convencional del camarón sugirió impactos sociales más positivos, principalmente por la oportunidad de generación de más empleos y mayor compromiso con la comunidad.

La incorporación de una biorrefinería en las industrias camarónicas de la región Caribe mostró ser un avance hacia la sostenibilidad bajo los criterios de análisis considerados. Además de contribuir a la economía circular con estrategias de valorización de residuos, la biorrefinería de camarón contribuiría a satisfacer nuevas dinámicas de los mercados en materia de innovación. El hecho de obtener productos de alto valor a partir de residuos demostraría el compromiso de las industrias de camarón por desarrollar prácticas más sostenibles. Estas unidades productivas también representarían una fuente de empleo formal para comunidades locales con impacto directo en indicadores de empleabilidad y pobreza multidimensional.

A pesar de las múltiples ventajas que podría traer una biorrefinería de camarón para el desarrollo económico de la región, la implementación de esta topología sigue siendo un desafío, no solo por la gradual recuperación del subsector camaronicultor sino por la falta de incentivos legales y fiscales que aceleren la reactivación económica e impulsen la innovación. A través del análisis de ciclo de vida social, se pudo identificar la necesidad de más interacciones sinérgicas entre el Gobierno, las empresas camaroneras y la comunidad. Lo anterior resulta ser decisivo en la toma de decisiones sobre invertir o no en este tipo de proyectos, por las barreras del contexto actual camaronicultor colombiano, marcado por la falta de créditos blandos y subsidios.

Los resultados obtenidos en capítulos anteriores presentan las bases para el desarrollo de nuevas unidades productivas sostenibles bajo el concepto de biorrefinería con las que se aprovecha integralmente el camarón, desde la carne hasta el exosqueleto. En general, la topología de biorrefinería propuesta demuestra estar en armonía con los cambios esperados para la industria camaronera cuando estas intervenciones tienen lugar. Con la futura implementación de esta topología se espera promover la competitividad de las industrias de camarón, contribuir al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible y al mismo tiempo, aportar valor agregado a la cadena de producción con retornos de inversión atractivos.

Abreviaturas

Capítulo I y II

ASPEN: *Advanced System for Process Engineering (Sistema Avanzado para Ingeniería de Procesos).*

CO₂: *Dióxido de carbono.*

CH₄: *Metano.*

CAPE: *Computer Aided Process Engineering (Ingeniería de Procesos Asistida por Computador)*

CaCO₃: *Carbonato de calcio.*

Ca₃(PO₄)₂: *Fosfato de Calcio.*

G: *Coefficiente del modelo NRTL.*

γ_i : *Coefficiente de actividad del componente i, para Ley Lewis-Randall.*

ϕ : *Coefficiente de fugacidad de la especie i.*

α_{ij} : *Constante de no aleatoriedad de las interacciones binarias ij.*

$\lambda_{ij}\lambda_{ji}$: *Constantes de interacción para un determinado par de componentes, modelo de Wilson.*

DOE: *Departamento de energía de los Estados Unidos.*

f_i^{*1} : *Fugacidad del componente i como sustancia pura.*

f_i^v : *Fugacidad del componente i en la fase vapor.*

f_i^l : *Fugacidad del componente i en la fase líquida.*

GEI: Emisión de gases de efecto invernadero.

HCl: Cloruro de hidrógeno o ácido clorhídrico.

LLE: Equilibrio líquido-líquido.

MBS: Metabisulfito de sodio.

MgCO₃: Carbonato de magnesio.

NaOH: Hidróxido de sodio.

NaCl: Cloruro de sodio.

Na₂CO₃: Carbonato de sodio.

N₂O: Óxido nitroso.

NBI: Necesidades básicas insatisfechas.

NRTL: Non-Random Two-Liquid (Modelo no aleatorio de dos líquidos).

n_i: Número de moles del componente *i*, para el cálculo de fugacidad.

pH: Potencial de hidrógeno.

τ: Parámetro del modelo NRTL.

Λ: Parámetro modelo de Wilson.

c_{ji} y d_{ji}: Parámetros binarios *c* y *d*, modelo NRTL.

R: Constante universal para gases ideales.

SRK: Soave Redlich Kwong.

T: Temperatura del sistema.

USD: United states dollars (Dólar estadounidense).

UNIQUAC: Universal QUAsi Chemical Equation.

UNIFAC: UNIQUAC Functional-group Activity Coefficients (UNIQUAC Coeficientes de actividad de grupos funcionales).

V_i: Volumen molar del componente puro a la temperatura del sistema, modelo de Wilson.

VLE: Equilibrio líquido-vapor.

Z: Factor de compresibilidad.

Capítulo III

ACR: Annual cost/revenue (Relación costo beneficio).

AFC: Annualized Fixed Costs (Costos fijos anualizados).

AOC: Annualized Total Operating costs (Costos operativos anualizados).

BEP: Breakeven point (Punto de equilibrio).

CCF: Cumulative Cash Flow (Flujo de caja acumulado).

CEPCI: Chemical Engineering Plant Cost Index (Índice de costos de plantas de ingeniería química).

D: Depreciation (Depreciación).

DFCI: Direct fixed capital investment (Inversión de capital fijo directa).

DGP: Gross Profit (depreciation included) (Beneficio bruto con depreciación incluida).

DPC: Direct productions costs (Costos de producción directos).

DPBP: Discounted payback period (Período de recuperación de la inversión incluyendo la depreciación).

EP: Economic potential (Potenciales económicos).

FCH: Fixed charges (Cargos directos).

FCI: Fixed capital investment (Inversión de capital fijo).

FOB: Free on board.

GE: General expenses (Gastos generales).

GP: Gross Profit (Beneficio bruto).

i: Interest (Interés).

IFCI: Indirect fixed capital investment (Inversión de capital fijo indirecta).

itr: Income taxes rate (Tasa impositiva).

MR: Maintenance and repairs (Mantenimiento y reparaciones).

m_{RM} : Raw material (Flujo de materia prima).

m_{RM-BEP} : Raw material at Breakeven point (Capacidad de producción de equilibrio).

MM USD: Millones de dólares estadounidense.

N: Años.

n: Años.

NOC: Normalized Operating costs (Costos totales operativos normalizados).

NVOC: Normalized Variable Operating costs (Costos operativos variables).

NVP: Net present value (Valor presente neto).

OL: Operational labor (Mano de obra operativa).

OC: Operating cost (Costos de operación).

PAT: Profit After taxes (Beneficio después de impuestos).

PBP: Payback Period (Período de Recuperación de la Inversión sin incluir depreciación).

POH: Production overhead (Gastos generales de producción).

ROI: Return on investment (Retorno de la inversión).

SUC: Startup costs (Costos de arranque).

θ_i : Theta i.

t: toneladas.

TAC: Total annual costs (Costos totales anualizados).

TCI: Total capital investment (Inversión total de capital).

TIR: Tasa interna de retorno (Internal rate of return, IRR).

U: Utilities (Utilidades).

USD: United states dollar (Dólar estadounidense).

WCI: Working capital investment (Inversión de capital de trabajo).

Capítulo IV

ACV: *Análisis de ciclo de vida (Life cycle assessment, LCA).*

α_i : *Absorción de calor por radiación por unidad de gas de efecto invernadero i , para GWP.*

α_{CO_2} : *Absorción de calor por radiación por unidad de dióxido de carbono, para GWP.*

α_i : *Cambio en la concentración de ozono debido a un cambio en la emisión de un compuesto orgánico volátil i , para el PCOP.*

$\alpha_{C_2H_4}$: *Cambio en la concentración de ozono, con respecto a la emisión de etileno, para PCOP.*

ACGIH: *Conferencia Americana de Industrias Gubernamentales.*

AP: *Acidification potential (Potencial de acidificación).*

ATP: *Acuatic toxicity potential (Potencial de toxicidad acuática).*

$b_i(t)$: *Emisión integrada de un compuesto orgánico volátil i hasta un tiempo t .*

$b_{C_2H_4}(t)$: *Emisión integrada de etileno hasta un tiempo t .*

$c_i(t)$: *Concentración del gas de efecto invernadero i .*

$c_{CO_2}(t)$: *Concentración de dióxido de carbono en un tiempo t después de haberse liberado.*

CFC-11: *Triclorofluorometano.*

C_2H_4 : *Etileno.*

EPA: *Environmental Protection Agency (Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos).*

GWP: *Global warming potential (Potencial de calentamiento global).*

HTPE: *Human Toxicity Potential by Inhalation or Dermal Exposure (Potencial de toxicidad humana por inhalación o exposición dérmica).*

HTPI: *Human toxicity potential by ingestion (Potencial de toxicidad humana por ingestión).*

K: *Kelvin (Unidad de temperatura).*

kg SO_2 -equiv.: *Kilogramos de dióxido de azufre equivalente.*

kg C₂H₄-equiv.: Kilogramos de etileno equivalente.

L: Litros.

LD₅₀: Lethal Dose (Dosis letal).

LC₅₀: Lethal concentration (Concentración letal).

m: Masa (kg) del gas emitido, para ODP.

m_i: Masa (kg) de un componente significativo *i* emitido, para AP.

m_o: Masa (kg) del compuesto orgánico volátil emitido, para PCOP.

M_i: Unidad de masa de la sustancia *i*, para AP.

M_{SO₂}: Unidad de masa del SO₂, para AP.

mg: miligramos.

MEIM: Minimization environmental impact method (Método de minimización de impacto ambiental).

NIOSH: National Institute for Occupational Safety and Health (Instituto Nacional para la Seguridad y Salud).

ODP: Ozone depleting potential (Potencial de Agotamiento del Ozono).

OH-: Radical hidroxilo.

OSHA: Occupational Safety and Health Administration (Administración de Seguridad y Salud en el Trabajo).

PEI: Potential environmental impacts (Impacto ambiental potencial).

PCOP: Photochemical Oxidation Potential (Potencial de oxidación fotoquímica o potencial de formación de smog).

SO₂: Dióxido de azufre.

t: Número de años para evaluar el GWP.

TRACI: Tool for reduction and assessment of chemicals and other environmental impacts (Reducción y evaluación de impactos químicos y otros impactos ambientales).

TLV: Threshold limit value (Valor umbral límite).

TTP: Terrestrial toxicity potential (Potencial de Toxicidad Terrestre).

V_i : Potencial de acidificación del componente i .

V_{SO_2} : Potencial de acidificación del SO_2 .

WAR: Waste algorithm reduction (Algoritmo de reducción de residuos).

$\delta[O_3]_i$: Agotamiento de ozono global producido por una unidad del gas i .

Capítulos V, VI, VII y VIII

Atm: Unidad de presión en atmósferas.

AEP: Annual economic profits (Beneficios económicos anuales).

ETA: Event Tree Analysis (Análisis de árbol de eventos).

Ex: Exergía.

F&E: Fire and explosion.

\dot{H} : Entalpía de la mezcla.

\dot{H}_0 : Entalpía de la mezcla a las condiciones del ambiente de referencia.

HAZOP: Hazard and Operability Study (Estudio de riesgo y operabilidad).

ISBL: Inside Battery Limits (Límites de la batería interna).

ISI: Inherent safety index (Índice de seguridad inherente).

I2SI: Integrated inherent safety index (Índice de Seguridad Inherente Integrado).

ISO: International Organization for Standardization (Organización Internacional para la Estandarización).

IST: Índice de sostenibilidad termodinámica.

I+D: Investigación y desarrollo.

LEL: Lower explosive limit (Límite inferior de explosividad).

LHV: Low heating value (Poder calorífico inferior o neto).

MSDS: Material safety data sheet (Hojas de seguridad).

OSBL: *Outside battery limits (Límites de la batería externa).*

ONU: *Organización de las Naciones Unidas o Asamblea General de las Naciones Unidas.*

PHA: *Preliminar hazard analysis (Análisis preliminar de riesgos).*

PIB: *Producto interno bruto.*

PIIS: *Prototype index for inherent safety (Índice prototipo de seguridad inherente).*

PNUMA: *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.*

PRD: *Puntos de referencia de desempeño.*

SASWROIM: *Safety and sustainability weighted return on investment metric (Métrica ponderada del retorno de la inversión por seguridad y sostenibilidad).*

S2R2WROIM: *Safety, sustainability, reliability, and resilience weighted return on investment metric (Métrica de seguridad, la sostenibilidad, la confiabilidad y la resiliencia ponderada de la inversión).*

SETAC: *Society of Environmental Toxicology and Chemistry (Sociedad de Toxicología y Química Ambiental).*

s-LCA: *Social life cycle assessment (Ciclo de vida social).*

SHDB: *Social Hotspots data base (Base de datos social hotspots).*

S₀: *Entropía de la mezcla a las condiciones del ambiente de referencia.*

T₀: *Temperatura del ambiente de referencia.*

UEL: *Upper Explosive Limit (Límite superior de explosividad).*

W: *work (trabajo del sistema).*

ω-3: *omega 3.*

Glosario

β -DN- acetil-glucosamina: también llamada GlcNAc, NAG o N-Acetilglucosamina, es una sustancia que se produce de forma natural en el organismo humano. Su función es formar moléculas llamadas glicosaminoglicanos (GAG, polímeros de cadena larga como el ácido hialuronato). La NAG se obtiene de una fuente marina natural.

β -(1-4) D-glucosamina: es un monosacárido abundante en la naturaleza, principalmente en el exoesqueleto de crustáceos y artrópodos, puede obtenerse de una fuente marina natural, por lo que se considera un producto natural. Es una sustancia que se produce naturalmente en el cuerpo, ayuda a reforzar y mantener juntos los ligamentos. Además, puede obtenerse de la hidrólisis ácida de la quitina y el quitosano.

Adsorción: mecanismo natural donde las moléculas de gas se mantienen unidas a una superficie sólida gracias a las fuerzas de Van der Waals. La adsorción hace referencia a la adhesión de moléculas de gases y líquidos a la superficie de sólidos porosos.

Actividad hemostática: es un fenómeno fisiológico que detiene el sangrado, es un mecanismo de defensa que junto con la respuesta inflamatoria y de reparación ayudan a proteger la integridad del sistema vascular después de una lesión tisular.

Agente floculante: son productos o sustancias que favorecen la formación de flóculos actuando como puente para captar mecánicamente las partículas en suspensión.

Alcalino: se usa para calificar aquello que dispone de álcali. Un álcali, es un hidróxido metálico que se comporta como base fuerte y que es altamente soluble en agua.

Análisis de sensibilidad: es una técnica usada para estudiar el impacto que tienen las variaciones en una de las variables independientes del modelo financiero sobre una variable dependiente que lo conforma. Permite observar el comportamiento de los procesos al realizar cambios en el mismos.

Biomasa residual: se origina de las actividades agrícolas y forestales o en sus respectivas industrias, pueden ser restos de poda de frutales, aserrín, cascaras, paja, bagazo, entre otros; surge como resultado de ciertas actividades humanas.

Biochar: según IBI “Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar that is Used in Soil” es un material sólido obtenido de la conversión termoquímica de biomasa en un ambiente limitado de oxígeno. Tiene características similares a las del carbón.

Biooil: también llamado bioaceite, se obtienen de las oleaginosas y de aceites vegetales fritos.

Biogás: es un gas que se obtiene gracias a reacciones de biodegradación de materia orgánica, mediante la acción de microorganismos y otros factores en ausencia de oxígeno.

Biocompatibilidad: capacidad que tiene un biomaterial de generar una respuesta biológica aceptable durante el tiempo y modo de contacto. También puede definirse como la ausencia de reacciones inmunitarias al contacto entre los tejidos del organismo y un material.

Biodegradabilidad: se entiende como la capacidad de descomposición aeróbica o anaeróbica de un material por la acción enzimática de organismos como bacterias, hongos y algas, bajo condiciones normales del medio ambiente.

Despolimerización: es el proceso de descomposición de la cadena del polímero hasta sus monómeros u oligómeros.

Exoesqueleto: es una cubierta dura que soporta y protege el cuerpo de algunos animales invertebrados, es decir, aquellos que no tienen esqueleto interno, como insectos, arácnidos, crustáceos.

Fluidos supercríticos: cualquier sustancia a temperatura y presión por encima de su punto crítico termodinámico. Puede cambiar rápidamente de densidad con pequeños cambios de temperatura o presión. Estos fluidos tienen la capacidad de extraer ciertos compuestos químicos con el uso de solventes específicos combinando temperatura y presión.

Híbrido: término que se usa para indicar combinación, puede ser entre especies, géneros, familias o características.

in situ: palabra de origen latino que significa “en el lugar”, “en el sitio”.

Neutralización: tratamientos que se realizan para llevar una sustancia, solución, producto o compuesto a un pH de 7 o muy cercano a este.

Polisacárido: polímero compuesto por una extensa sucesión de monosacáridos, unidos entre sí a través de enlaces glucosídicos.

Remediación ambiental: conjunto de acciones necesarias para llevar a cabo la limpieza de cualquier descarga o sospecha de descarga de contaminantes, mediante una evaluación preliminar, investigación del sitio, determinación del alcance del problema, estudio de factibilidad y acciones correctivas.

Polielectrolito: son compuestos que tienen la misma reacción, se separan sus iones cuando entran en contacto con el agua, positivos por un lado y negativos por otro.

Química verde: es una propuesta para reducir o eliminar los problemas ambientales derivados de actividades industriales. Según el EPA, es el uso de la química para prevenir la contaminación y el diseño de productos y procesos beneficiosos para el ambiente.

Smog: mezcla química de humo y niebla, es un tipo de contaminación atmosférica con concentraciones de óxido de sulfuro y nitrógeno, hidrocarburos, millones de partículas de plomo, magnesio, cobre, níquel, zinc, carbón.

Índice de tablas

Tabla 1.1.	<i>Clasificación de biorrefinerías basadas en las generaciones tecnológicas.....</i>	<i>48</i>
Tabla 2.1.	<i>Modelos de propiedades termodinámicas disponibles en un simulador</i>	<i>75</i>
Tabla 2.2.	<i>Trabajos recientes sobre aprovechamiento de camarón.....</i>	<i>86</i>
Tabla 2.3.	<i>Composición química de camarón fresco modelada</i>	<i>92</i>
Tabla 2.4.	<i>Composición química del exoesqueleto de camarón modelada.....</i>	<i>93</i>
Tabla 2.5.	<i>Condiciones de operación y composición másica de las principales corrientes de la sección de procesamiento de camarones.....</i>	<i>96</i>
Tabla 2.6.	<i>Condiciones de operación y composición másica de las principales corrientes del procesamiento del exoesqueleto de camarón.....</i>	<i>99</i>
Tabla 2.7.	<i>Condiciones de operación y composición másica de las principales corrientes de la sección de recuperación de quitina.....</i>	<i>99</i>
Tabla 2.8.	<i>Condiciones de operación y composición másica de las principales corrientes de la sección de producción de quitosano.....</i>	<i>101</i>

Tabla 2.9.	<i>Condiciones de operación y composición másica de las principales corrientes de la sección de recuperación de astaxantina.....</i>	<i>102</i>
Tabla 2.10.	<i>Comparación de las propiedades de la quitina.....</i>	<i>103</i>
Tabla 2.11.	<i>Comparación de las propiedades del quitosano.....</i>	<i>103</i>
Tabla 2.12.	<i>Comparación de las propiedades de la astaxantina.....</i>	<i>103</i>
Tabla 2.13.	<i>Indicadores de rendimiento técnico por sección.....</i>	<i>105</i>
Tabla 2.14.	<i>Descripción de equipos de la sección de procesamiento de camarones.....</i>	<i>106</i>
Tabla 2.15.	<i>Descripción de equipos de la sección de recuperación de quitina.....</i>	<i>106</i>
Tabla 2.16.	<i>Descripción de equipos de la sección de producción de quitosano.....</i>	<i>108</i>
Tabla 2.17.	<i>Descripción de equipos de la sección de recuperación de astaxantina.....</i>	<i>108</i>
Tabla 3.1.	<i>Estimación de los rubros de inversión total de capital</i>	<i>121</i>
Tabla 3.2.	<i>Estimación de los rubros de costos totales de operación</i>	<i>126</i>
Tabla 3.3.	<i>Consideraciones económicas para la topología de biorrefinería de camarón.....</i>	<i>135</i>
Tabla 3.4.	<i>Costo de materias primas y flujos másicos</i>	<i>136</i>
Tabla 3.5.	<i>Precio de venta de los productos y flujos másicos</i>	<i>136</i>
Tabla 3.6.	<i>Inversión total de capital para la biorrefinería de camarón.....</i>	<i>137</i>
Tabla 3.7.	<i>Costos totales de operación de la topología de biorrefinería de camarón.....</i>	<i>138</i>

Tabla 3.8.	<i>Indicadores económicos para la topología de biorrefinería de camarón.....</i>	<i>139</i>
Tabla 5.1.	<i>Nomenclatura de las etapas de la biorrefinería de camarón.....</i>	<i>183</i>
Tabla 5.2.	<i>Exergía química estándar componentes de la topología de biorrefinería de camarón.....</i>	<i>184</i>
Tabla 5.3.	<i>Exergía física de las principales corrientes de la topología de biorrefinería de camarón.....</i>	<i>185</i>
Tabla 6.1.	<i>Subíndices de seguridad inherente</i>	<i>200</i>
Tabla 6.2.	<i>Determinación de los subíndices de calor de reacción I_{RM} y I_{RS}.....</i>	<i>202</i>
Tabla 6.3.	<i>Determinación del subíndice de interacción química.....</i>	<i>203</i>
Tabla 6.4.	<i>Determinación del subíndice de inflamabilidad</i>	<i>204</i>
Tabla 6.5.	<i>Determinación del subíndice de explosividad</i>	<i>204</i>
Tabla 6.	<i>Determinación del subíndice de exposición tóxica.....</i>	<i>205</i>
Tabla 6.7.	<i>Determinación del subíndice de corrosividad.....</i>	<i>206</i>
Tabla 6.8.	<i>Determinación del subíndice de inventario.....</i>	<i>207</i>
Tabla 6.9.	<i>Determinación del subíndice de temperatura</i>	<i>208</i>
Tabla 6.10.	<i>Determinación del subíndice de presión</i>	<i>208</i>
Tabla 6.11.	<i>Determinación del subíndice de seguridad de equipos ISBL.....</i>	<i>210</i>
Tabla 6.12.	<i>Determinación del subíndice de seguridad de equipos OSBL.....</i>	<i>210</i>
Tabla 6.13.	<i>Determinación del subíndice de estructura segura de proceso</i>	<i>211</i>

Tabla 6.14.	<i>Parámetros de seguridad para sustancias peligrosas.....</i>	<i>214</i>
Tabla 7.1.	<i>Clasificación de las subcategorías de impacto.....</i>	<i>227</i>
Tabla 7.2.	<i>Trabajos recientes de la metodología s-LCA y teoría del cambio aplicados a enfoques de biorrefinería.....</i>	<i>230</i>
Tabla 7.3.	<i>Indicadores seleccionados para la s-LCA de la biorrefinería de camarón.....</i>	<i>237</i>
Tabla 8.1.	<i>Métricas socio-ambientales y económicas para diferentes escenarios.....</i>	<i>259</i>

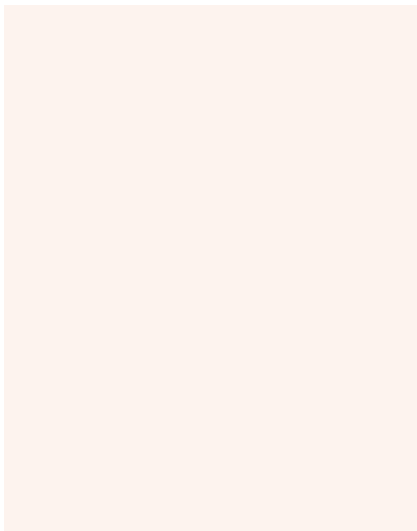
Índice de figuras

Figura 1.	<i>Camarón cultivado en la costa Atlántica</i>	<i>34</i>
Figura 1.1.	<i>a) Estructura química de la quitina. b) Quitina a partir de exoesqueleto de camarón</i>	<i>37</i>
Figura 1.2.	<i>a) Estructura química del quitosano. b) Quitosano a partir de la desacetilación de la quitina</i>	<i>40</i>
Figura 1.3.	<i>a) Estructura química de la astaxantina. b) Astaxantina.....</i>	<i>42</i>
Figura 2.	<i>Secciones de procesamiento de la topología de biorrefinería de camarón.....</i>	<i>87</i>
Figura 2.2.	<i>Diagrama de bloques de la sección de procesamiento de camarones.....</i>	<i>87</i>
Figura 2.3.	<i>Diagrama de bloques de la sección de recuperación de quitina.....</i>	<i>89</i>
Figura 2.4.	<i>Diagrama de bloques de la sección de producción de quitosano.....</i>	<i>90</i>
Figura 2.5.	<i>Diagrama de bloques sección de recuperación de astaxantina.....</i>	<i>91</i>
Figura 2.6.	<i>Diagrama de flujo de la simulación de la sección de procesamiento de camarones.....</i>	<i>95</i>

Figura 2.7.	<i>Diagrama de flujo de la simulación de:</i> a) procesamiento del exoesqueleto de camarón y b) sección de recuperación de quitina.....	98
Figura 2.8.	<i>Diagrama de flujo de simulación de la sección de producción de quitosano</i>	100
Figura 2.9.	<i>Diagrama de flujo de simulación de la sección de recuperación de astaxantina.....</i>	102
Figura 3.1.	<i>Análisis del punto de equilibrio para la topología de biorrefinería de camarón.....</i>	140
Figura 3.2.	<i>Efecto del precio de venta de la carne de camarón sobre la eficiencia On-Stream en el punto de equilibrio</i>	141
Figura 3.3.	<i>Efecto del costo de la materia prima sobre rentabilidad de la topología de biorrefinería de camarón.....</i>	143
Figura 3.4.	<i>Efecto de los costos variables de operación sobre el ROI para la topología de biorrefinería de camarón</i>	144
Figura 3.5.	<i>Efecto de los costos variables de operación sobre el PBP para la topología de biorrefinería de camarón</i>	145
Figura 3.6.	<i>Tendencia del valor presente neto para la biorrefinería de camarón.....</i>	146
Figura 4.1.	<i>Diagrama Sankey de las contribuciones ambientales de los residuos de camarón y los productos de alto valor... </i>	162
Figura 4.2.	<i>Rendimiento ambiental global de la topología de biorrefinería de camarón: a) PEI por hora y b) PEI por masa de productos.....</i>	163
Figura 4.3.	<i>Impactos toxicológicos de la topología de biorrefinería de camarón.....</i>	165
Figura 4.4.	<i>Impactos atmosféricos de la biorrefinería de camarón.....</i>	167
Figura 4.5.	<i>Comparación del rendimiento ambiental entre los enfoques convencional y de biorrefinería</i>	168

Figura 5.1.	<i>Contribución de las secciones del proceso a los parámetros exergeticos.....</i>	<i>186</i>
Figura 5.2.	<i>Eficiencia exergetica de la biorrefinería de camarón por etapas.....</i>	<i>188</i>
Figura 5.3.	<i>Diagrama Sankey de irreversibilidades para la biorrefinería de camarón.....</i>	<i>189</i>
Figura 5.4.	<i>Comparación de la eficiencia exergetica global de la biorrefinería de camarón.....</i>	<i>190</i>
Figura 6.1.	<i>Subíndices de seguridad química para la topología de biorrefinería de camarón.....</i>	<i>215</i>
Figura 6.2.	<i>Subíndices de seguridad química para la topología de biorrefinería de camarón.....</i>	<i>216</i>
Figura 6.3.	<i>Índice total de seguridad inherente para la topología de biorrefinería de camarón.....</i>	<i>217</i>
Figura 6.4.	<i>Comparación del índice total de seguridad inherente para la topología de biorrefinería de camarón.....</i>	<i>218</i>
Figura 7.1.	<i>Límites del sistema y fases aplicadas en el s-LCA.....</i>	<i>231</i>
Figura 7.2.	<i>Escenarios para el análisis de ciclo de vida social.....</i>	<i>232</i>
Figura 7.3.	<i>Esquema de la teoría del cambio para la industria camaronesa.....</i>	<i>235</i>
Figura 7.4.	<i>Indicadores de desempeño social de la biorrefinería.....</i>	<i>239</i>
Figura 7.5.	<i>Resultados sociales de la biorrefinería de camarón en las ubicaciones 1 y 2.....</i>	<i>240</i>
Figura 7.6.	<i>Tendencias de los posibles cambios sociales para el sistema de biorrefinería de residuos de camarones.....</i>	<i>242</i>
Figura 7.7.	<i>Sinergias entre las partes interesadas para el procesamiento del camarón.....</i>	<i>243</i>

Figura 7.8.	<i>Efecto de la capacidad de producción en el desempeño de los indicadores sociales de la biorrefinería</i>	<i>244</i>
Figura 8.1.	<i>Efecto de la capacidad de la planta en la métrica del ROI basada en la sostenibilidad</i>	<i>260</i>



En Colombia, sectores como la pesca y la acuicultura son de gran importancia, pues cultivan productos para el consumo nacional e internacional, siendo el camarón un producto de referencia de la acuicultura marina. El cultivo de camarón en el país produce grandes cantidades de residuos que no son aprovechados: cabeza, cola y exoesqueleto (caparazón). El presente libro propone la valorización de los desechos del camarón cultivado en la región caribe colombiana aplicando los conceptos de biorrefinería y aprovechamiento sostenible, para ello presenta un enfoque basado en el diagnóstico del sector camaronicultor de la región caribe, la identificación de los co-productos potencialmente obtenibles (quitina, quitosano y astaxantina), el análisis técnico avanzado de la posible configuración de proceso basado en conceptos matemáticos, físicos, químicos y termodinámicos, la evaluación económica, de calidad energética, ambiental, de seguridad inherente y de impactos sociales de la biorefinería y la obtención del retorno sostenible de la inversión en su posible implementación, todo esto apoyado en la ingeniería de procesos asistida por computador. Los fundamentos teóricos y el procedimiento metodológico de cada uno de los estudios aquí realizados se encuentran claramente explicados a lo largo del libro, lo cual permitirá al lector interiorizar el conocimiento y extrapolar el enfoque aquí propuesto a otras cadenas productivas con el fin de generar sus propios desarrollos.