



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**Aprovechamiento integral de los residuos del camarón:
Balance de materia del proceso global para la obtención de
pigmentos carotenoides (astaxantinas)**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICA DE ALIMENTOS

PRESENTA

MONSERRAT MONCADA MURILLO



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa

Vocal: M. en A.I. Landy Irene Ramírez Burgos

Secretario: M. en C. Agustín Reyo Herrera

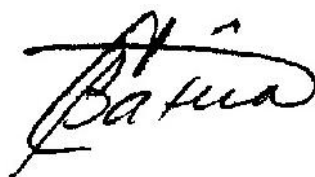
1er. Suplente: Dra. Marisela Bernal González

2do. Suplente: M. en C. Rolando Salvador García Gómez

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

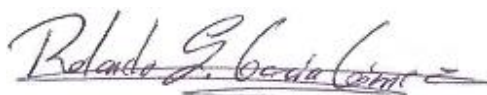
-) LABORATORIOS E-301, E-302, E-303, CONJUNTO E, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM
-) BIDI, UNAM
-) USO DE LOS PAQUETES DE CÓMPUTO PROPORCIONADOS POR LA FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

ASESORA DEL TEMA:



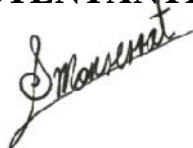
Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa

SUPERVISOR TÉCNICO:



M. en C. Rolando Salvador García Gómez

SUSTENTANTE:



Monserrat Moncada Murillo

DECLARATORIA

“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o con referencia a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante recursos editoriales convencionales”



Monserrat Moncada Murillo

RECONOCIMIENTOS

Se recibió apoyo para la compra de materiales y reactivos por parte de la DGAPA de la UNAM mediante los proyectos PAPIME Claves EN-103704, PE-101709 y PE-1005-14 y del Programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado de la Facultad de Química de la UNAM (PAIP) Claves 50009065 y 50009067

A la Dra.-Ing. María del Carmen Durán Domínguez por su orientación, consejos y apoyo brindados durante el proyecto. A los miembros del honorable jurado por sus valiosas recomendaciones que mejoraron este documento

A la Asesoría Técnica por parte del Maestro en Ciencias Rolando Salvador García Gómez y a la ayuda recibida durante todo el proyecto por parte de la IQ Beatriz Tlelo Bárcena, así como a las valiosas sugerencias de los miembros del jurado ya que gracias a sus recomendaciones se mejoró mucho este documento

A todo el personal académico y administrativo de los Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental (LIQAyQA), así como del personal académico de la Unidad de Cómputo de la Facultad de Química por el uso de las paqueterías y de la Coordinación de Información Documental de la Facultad de Química de la UNAM para obtener los artículos que no se podían bajar de las redes internacionales

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Química por brindarme las herramientas para convertirme en una profesional en lo que realmente me apasiona. Gracias a todos aquellos que formaron parte de mi formación académica permitiéndome adquirir los conocimientos necesarios para poder superar los retos que se me presentaron. Sobre todo, agradezco a la Dra.-Ing. María del Carmen Durán Domínguez y al Mtro. En Ciencias Rolando Salvador García Gómez por acompañarme en esta última etapa de la carrera, su guía es algo que agradeceré y llevaré conmigo el resto de mi vida.

Gracias a mi familia por su apoyo incondicional a lo largo de esta etapa y de toda mi vida, mis padres, abuelos, tíos y primos. A mi pareja y amigos por ser mi compañía a lo largo de todos estos años, siendo parte de experiencias maravillosas.

Por último, gracias a quien esté leyendo este trabajo, permitiendo que mis conocimientos, investigación y esfuerzo lleguen a ser parte de su repertorio de información.

ÍNDICE

| | Página |
|---|--------|
| Índice de tablas y figuras | 8 |
| Glosario | 10 |
| Resumen | 11 |
| Capítulo 1. PROBLEMÁTICA | 12 |
| 1.1. Introducción | 12 |
| 1.2. Justificación | 13 |
| 1.3. Objetivos | 15 |
| 1.3.1. Objetivos generales | 15 |
| 1.3.2. Objetivos particulares | 15 |
| 1.4. Metas | 15 |
| Capítulo 2. MARCO TEÓRICO | 17 |
| 2.1. Generalidades del camarón | 17 |
| 2.1.1. Producción de camarón en México | 18 |
| 2.1.2. Composición del camarón | 20 |
| 2.1.2.1. Proteína | 21 |
| 2.1.2.2. Quitina | 22 |
| 2.1.2.3. Pigmentos | 23 |
| 2.2. Astaxantina | 25 |
| 2.2.1. Propiedades de la astaxantina | 26 |
| 2.2.2. Métodos de extracción de la astaxantina | 28 |
| 2.3. Softwares de simulación de procesos | 31 |
| 2.3.1. ASPEN Plus | 32 |
| Capítulo 3. METODOLOGÍA | 33 |
| 3.1. Revisión bibliográfica | 33 |
| 3.2. Análisis de la información | 36 |
| 3.3. Simulación computacional del proceso | 38 |
| Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 41 |
| 4.1. Simulación de procesos | 41 |
| 4.1.1. Flujos y composiciones de las corrientes | 41 |

| | | Página |
|--------------------|---|--------|
| | 4.1.2. Determinación de costos y rentabilidad | 48 |
| Capítulo 5. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 51 |
| | 5.1. Conclusiones | 51 |
| | 5.2. Recomendaciones | 51 |
| Anexos | | 53 |
| Anexo 1. | Metodologías detalladas para la simulación en Aspen Plus® | 53 |
| Anexo 2. | Disposición controlada de los residuos producidos en esta investigación | 80 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 81 |

Índice de tablas y figuras

Lista de tablas

| | Página |
|---|--------|
| Tabla 2.1. Composición teórica reportada del camarón blanco | 20 |
| Tabla 2.2. Composición teórica reportada del cefalotórax del camarón blanco | 21 |
| Tabla 3.1. Resumen de los documentos revisados sobre la extracción de astaxantina de crustáceos | 35 |
| Tabla 4.1. Relación de equipos y claves en el simulador ASPEN Plus | 41 |
| Tabla 4.2. Composición y flujo de las corrientes en el lavador | 43 |
| Tabla 4.3. Composición y flujo de las corrientes en el secador | 43 |
| Tabla 4.4. Composición y flujo de las corrientes en el molino | 44 |
| Tabla 4.5. Composición y flujo de las corrientes en el tamiz | 44 |
| Tabla 4.6. Composición y flujo de las corrientes en el sedimentador | 44 |
| Tabla 4.7. Composición y flujo de las corrientes en la centrifuga | 45 |
| Tabla 4.8. Resultado del análisis económico por equipo obtenido en Aspen Plus ® | 48 |

Lista de figuras

| | Página |
|--|--------|
| Figura 2.1. Morfología externa del camarón (FAO, 1995) | 17 |
| Figura 2.2. Top 10 de entidades con mayor producción de camarón (SIAP, 2020) | 19 |
| Figura 2.3. Producción nacional de camarón 2010-2019 (SIAP, 2020) | 19 |
| Figura 2.4. Estructura de la quitina y quitosana (Khor y Lim, 2003) | 23 |
| Figura 2.5. Estructura molecular de la astaxantina y estereoisómeros (Zhao <i>et al.</i> , 2019) | 25 |
| Figura 3.1. Organización de la información recopilada a través de la búsqueda bibliográfica | 34 |
| Figura 3.2. Diagrama de bloques de la metodología propuesta para obtener pigmentos carotenoides ricos en astaxantina a partir de | 37 |

| | Página |
|--|--------|
| subproductos de camarón (Romero-Olmos, 2019) | |
| Figura 3.3. Metodología para la simulación de equipos en los programas de Aspen Tech ® | 40 |

GLOSARIO

| | |
|---|--|
| BIDI | Biblioteca Digital de la UNAM (México) |
| DOF | Diario Oficial de la Federación (México) |
| Época de veda | Periodo en el cual se prohíbe la captura para así evitar la depredación de los recursos naturales, permitiendo así su reproducción y subsistencia. |
| Fermentación <i>versus</i> biodegradación | La fermentación fue estudiada por Louis Pasteur quien le dio ese nombre. Es una biorreacción anaerobia donde la levadura <i>Saccharomyces cerevisiae</i> descompone a la glucosa en alcohol etílico y bióxido de carbono. Por ello, cualquier otra biorreacción o biodegradación no debe llamarse fermentación |
| Masa <i>versus</i> peso | Masa se refiere a una porción de materia y es medida en kilogramos. Por su parte, el peso es la fuerza con la que la gravedad atrae a la materia y es medida en newtons |
| Nutracéutico | Hace referencia a todos aquellos alimentos que han demostrado científicamente poseer efectos beneficiosos sobre la salud humana |
| Pervaporación | Proceso en el cual se separan dos líquidos miscibles con ayuda de una membrana semi-permeable a través de permeación preferencial donde uno de ellos sale en fase vapor. |
| RPBI | Siglas para residuos peligrosos biológico-infecciosos (México) |
| UNAM | Universidad Nacional Autónoma de México |
| <i>Unicel</i> | Nombre dado en México a un polímero sintético espumado del estireno muy contaminante |

Nota: Esta tesis usa el punto decimal (DOF, 2009) y pone los guarismos junto a °C y a %

RESUMEN

La contaminación ambiental es uno de los mayores problemas que en la actualidad afectan el estilo de vida. Cuando los residuos orgánicos son desechados de manera inadecuada pueden convertirse en focos de infección. Con el crecimiento demográfico y el aumento de las necesidades alimentarias es necesario reaprovechar la mayor cantidad de los recursos marinos evitando la contaminación de tiraderos a cielo abierto y de cuerpos de agua. Afortunadamente, a través de los años se ha explorado cómo sacar provecho de ellos. La composición del cefalotórax y exoesqueleto de camarón que componen estos subproductos se basa en moléculas funcionales tales como proteínas de buena calidad, quitina y astaxantina. La astaxantina es un nutraceutico que ha demostrado tener amplias aplicaciones en la salud humana, que van desde ayuda en problemas cardiovasculares hasta acciones preventivas ante el cáncer. Por estas razones, en este texto se planteó el reaprovechamiento de los subproductos del camarón con énfasis en la recuperación de sus pigmentos, especialmente de la astaxantina. Para ello fue necesario realizar una investigación bibliográfica para conocer las metodologías a través de las cuales se pueden obtener los pigmentos del camarón. Posteriormente, se analizó exhaustivamente la información recabada para determinar cuál es la adecuada para llevar a una simulación computacional. La simulación realizada con el software Aspen Plus® se hizo para cada operación unitaria del proceso, lo que permitió realizar los balances de materia y energía para conocer la cantidad de pigmentos obtenida. De igual manera, esta herramienta computacional permite hacer un análisis de costos para conocer la cantidad necesaria para la inversión inicial de una Planta Piloto. Los resultados arrojan que los balances de materia únicamente se ven afectados en las operaciones de secado y extracción. En el secado, la cantidad de agua se ve disminuida en un 97.93%. Por su parte, en la extracción se logra obtener la totalidad de los pigmentos con ayuda de aceite de soya. El costo de la inversión en los equipos para llevar a cabo este proceso en una planta de tratamiento de subproductos de camarón es de \$8,652,870 USD. Por su parte, las ganancias por la comercialización de los pigmentos evaluados como astaxantina extraída se estiman en \$11,793,676.62 USD/año por lo que se recuperaría la inversión inicial en el primer año y se podría ayudar a la industria del camarón aprovechando a su vez los subproductos producidos en ella.

Palabras clave: Aprovechamiento integral, subproductos del camarón, balances de materia, proceso global, pigmentos carotenoides, astaxantinas

CAPÍTULO 1

PROBLEMÁTICA

1.1. Introducción

Alrededor de 9.8% de la producción de alimentos marinos a nivel internacional corresponde a los crustáceos (FAO, 2018). En los litorales de México el recurso camarón es una de las actividades pesqueras más sólida, establecida y grande, considerando flota, recursos humanos y beneficios económicos. México es el 7° productor de camarón a nivel mundial, produciendo 237,674 toneladas en el año 2019 (SIAP, 2020). Los estados de Sinaloa y Sonora son los de mayor captura de camarón en el Océano Pacífico, siendo las especies dominantes los tipos de camarones café, azul y blanco (SEMARNAT, 2016). En los últimos cinco años el volumen de captura y cosecha de este crustáceo ha tenido una propensión al alza; en 2019 continuó con esta tendencia, aumentó 3.2% respecto al año anterior (SEMARNAT, 2016). El volumen exportado del bien durante 2019 excedió en 8 mil 480 toneladas al conseguido en 2018 (SIAP, 2020).

Dependiendo de las especies capturadas, del tamaño y del proceso de pelado, el cefalotórax y el exoesqueleto comprenden entre el 40-50% de la materia prima y son generalmente descartados como desechos. A partir del crecimiento de la acuicultura, la cantidad de residuos generados por la industria camaronícola ha crecido de manera exponencial. Su mala disposición genera residuos peligrosos biológico-infecciosos (RPBI por sus siglas) ya que se descomponen bioquímicamente provocando la proliferación de microorganismos potencialmente patógenos en las áreas donde son desechados. Debido a la gran cantidad de productos industrializados potencialmente fabricados a partir del camarón es que este proyecto tiene su razón de ser.

Por ello, se ha estudiado la composición de los subproductos del camarón con el objetivo de conocer nuevas estrategias para su aprovechamiento (Hamed et al., 2016). Esta caracterización

indica que contienen altas cantidades de materia orgánica como proteína, quitina, lípidos, pigmentos, etc., e inorgánica como el carbonato de calcio (Yan y Chen, 2015).

Los residuos que incluyen tanto cefalotórax como exoesqueleto de camarón son una fuente natural y económica de nutraceuticos como son los pigmentos carotenoides, siendo el más abundante, la astaxantina y también las proteínas de buena calidad (García-Gómez et al., 2004). Además, contienen la quitina, un biopolímero de gran utilidad (Prameela et al., 2017). Por ello, más que residuos son subproductos con un enorme valor potencial (Calderón-Villagómez et al., 1992; Cañipa et al., 1998; Durán-Domínguez-de-Bazúa et al., 2021; Escobedo et al., 1999; Flores-Ortega et al., 2004; García et al., 1999; García-Gómez et al., 2021). La astaxantina es un compuesto que ha demostrado tener una gran funcionalidad como antioxidante y también es usado contra una amplia gama de problemas cardiovasculares, entre otros (Mendoza-Pérez et al., 2014; Nirmal et al., 2020). Para su obtención se ha utilizado la extracción con solventes orgánicos e inorgánicos. Dependiendo del uso que se le vaya a dar es pertinente emplear el solvente que, además de que sea económico, no tenga impacto sobre el ambiente y que no sea tóxico si es que el producto va a ser ingerido por personas o animales. Los aceites vegetales y animales (pescado) se han utilizado con éxito como disolventes para la extracción de componentes carotenoides de fuentes vegetales y crustáceos. La ventaja de utilizar aceites comestibles es que se consideran una buena barrera contra el oxígeno, lo que reduce los procesos de oxidación, contribuyendo como fuente de energía si el producto se aplica en formulaciones alimentarias (Gutiérrez-Cabello et al., 2009; Mezzomo et al., 2011). Incluso se han usado enzimas para separar la quitina y liberar las carotenoproteínas (Ramírez-Cruz, 2013; Ramírez-Cruz et al., 2013).

1.2. Justificación

En esta investigación se plantea el aprovechamiento integral de los subproductos del camarón a través de la recuperación de los principales compuestos bioactivos presentes, específicamente los pigmentos carotenoides.

La astaxantina (3, 3'-dihidroxi- β -caroteno-4, 4'-diona) es la principal xantofila obtenida de los caparazones de los crustáceos, la cual es derivada de la transformación oxidativa del β -caroteno o la zeaxantina ingerida a través de la alimentación de microalgas. La estructura polar-nopolar-polar de la astaxantina le permite alinearse en la doble capa fosfolipídica de la membrana celular y exponer ambos finales hidrofílicos al ambiente acuoso. La forma libre de la astaxantina es sensible a la oxidación. La versatilidad en la mayoría de las características moleculares de los nutraceuticos y sus propiedades funcionales los hacen una ventaja específica para la utilización humana y para la protección del ambiente. Sin embargo, las propiedades varían dependiendo de la fuente, proceso de extracción, purificación y tratamiento (Ambati et al., 2014).

Su obtención puede hacerse utilizando un método amigable con el ambiente, como los basados en los preceptos de la química verde de Török y Dransfield (2018) que vienen desde los años 90 del siglo pasado con el hoy Prof. Emérito Stanley E. Manahan (1997); es decir, previniendo daños a la estructura de interés, usando sustancias químicas y solventes seguros, buscando la eficiencia energética, usando materias primas renovables como es este caso, disminuyendo la cantidad de derivados y previniendo la generación de residuos.

Una vez definido el proceso para la separación de las astaxantinas de los residuos del camarón, se realizará una simulación de las operaciones unitarias de ese proceso utilizando el software Aspen Plus®. Esta simulación se enfocará a realizar un balance de materia global ingresando como entrada un estimado de la cantidad de residuos que se pueden tratar en una Planta Piloto.

Con ello, se determinarán las cantidades de pigmentos carotenoides (medidos como astaxantina) que podrían obtenerse a partir de ese estimado de la cantidad de residuos a procesar. Esta simulación también permitirá evaluar la cantidad de agua utilizada, así como la determinación de los costos estimados del mismo permitiendo definir la viabilidad de su escalamiento.

Esto se hará con la finalidad tanto de apoyar a la industria pesquera como a las granjas camaronícolas para que, a partir de la recuperación de este producto de alto valor agregado

aprovechando sus hasta ahora residuos, puedan tener un ingreso adicional procesando esos subproductos especialmente para los pescadores en época de veda.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

Realizar una búsqueda bibliográfica de los mejores procesos de obtención de las astaxantinas derivadas de los residuos del camarón seleccionando de ellos el que posea una potencialidad mayor.

Evaluar ese proceso seleccionado por medio de una simulación empleando el paquete Aspen Plus® con el apoyo de los preceptos de la química verde definiendo la rentabilidad del proceso a través de estas paqueterías obteniendo un balance de material global.

1.3.2. Objetivos particulares

- Aprovechar integralmente los residuos de camarón a través de la recuperación de pigmentos carotenoides (medidos como astaxantina), utilizando un método amigable con el ambiente.
- Realizar una simulación del proceso utilizando el programa Aspen Plus® enfocándose en un balance de materia global que determine la cantidad de agua utilizada, así como las cantidades de pigmentos carotenoides (astaxantina) obtenidos.
- Determinar los costos estimados del proceso definiendo la viabilidad en su escalamiento empleando el paquete Aspen Plus®.

1.4. Metas

- Obtención de un estimado de costos de instalación de una planta de tratamiento de residuos de camarón con base en datos para un lugar específico de México.

- Determinación de la cantidad de productos obtenidos por el tratamiento de residuos de camarón a partir de balances de materia simulados por medio de paqueterías comerciales.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades del camarón

El camarón es un crustáceo decápodo invertebrado que se desarrolla mayormente en áreas intertropicales y subtropicales. Su crecimiento óptimo se da en temperaturas entre 24 y 28°C y concentraciones de salinidad que van de 23 a 36%. Son animales omnívoros, teniendo una amplia variedad de alimentos, desde carroña (cadáveres de otros animales, como los seres humanos que comen animales y plantas muertos), algas y especies acuáticas pequeñas, dependiendo de la especie lo consumen por filtración o alimentación directa (Rivera-Velázquez, 2008).

Su cuerpo se divide en tres partes principales: cefalotórax, abdomen y telson. Posee diversos apéndices que se dividen en anténulas, antenas, mandíbulas, maxilas, maxilípedos y periópodos (Barbosa-Saldaña et al., 2012). Para poder nadar cuentan con 6 pares de pleópodos en el abdomen y urópodos en el telson, tal como se ve en la Figura 2.1.

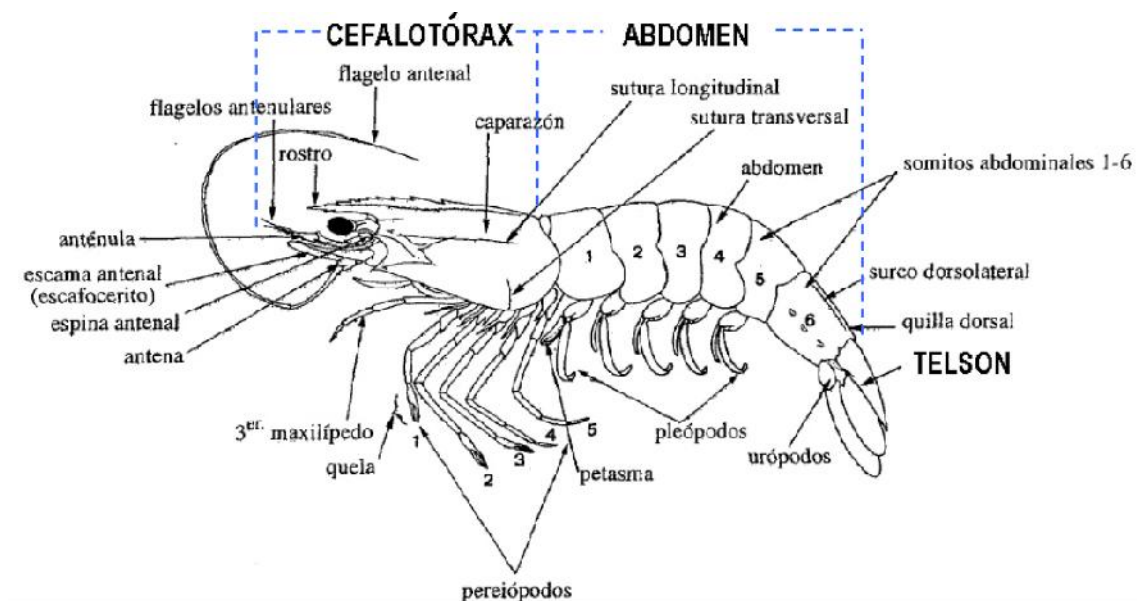


Figura 2.1. Morfología externa del camarón (FAO, 1995)

Todo el cuerpo de este crustáceo se encuentra cubierto de un exoesqueleto formado por quitina, sales inorgánicas y proteínas que tiene como funciones recubrirlo, protegerlo y soportarlo. Tiene una unión directa con articulaciones y con los músculos permitiéndole así realizar movimientos vitales.

Las especies de camarón presentes en las costas de México son el camarón café (*Farfantepenaeus californiensis*), el “camarón azul” (*Litopenaeus stylirostris*), el “camarón blanco” (*Litopenaeus vannamei*) y el “camarón rojo” (*Penaeus brevisrostris*) del lado del Océano Pacífico y el Golfo de California, mientras que en el Golfo de México se encuentran el “camarón café” (*Penaeus aztecus*), el “camarón rosado” (*Penaeus duorarum*) y el “camarón blanco” (*Penaeus setiferus*) (CONAPESCA, 2009).

En el estado de Sinaloa se encuentra la mayor producción de camarón en todo México, donde el 40.3% de la captura nacional fue recuperada (SIAP, 2020). A partir de un estudio realizado por Ruiz-Luna et al. (2010), en la costa de Sinaloa la especie predominante fue *Farfantepenaeus californiensis* con un 61% de predominancia en promedio durante los 12 años de registros que fueron tomados en cuenta. Le siguieron en importancia el camarón azul con el 27% y el camarón blanco representando el 11%. La camaronicultura es una actividad que también se ha visto en crecimiento en los últimos años en esta zona, siendo el camarón blanco la especie más producida (Puga-López et al., 2013) debido al amplio conocimiento de esta especie.

2.1.1. Producción de camarón en México

México es el séptimo productor mundial de camarón, lo cual indica que 3 de cada 100 toneladas de estos crustáceos provienen de nuestro país. De lo producido, una parte es exportada, hecho por el que en el año 2018 se obtuvieron 386 millones de dólares, yéndose la mayoría de las exportaciones a los Estados Unidos (SIAP, 2020).

La SADER reportó 47,664 toneladas de captura de camarón en la temporada 2019-2020, donde el 92.9% de esta cantidad se concentró en las entidades de Sinaloa, Sonora, Tamaulipas,

Nayarit y Baja California Sur (Figuras 2.2, 2.3). Únicamente Sinaloa logró extraer 19,551 toneladas, siendo el estado con mayor producción (CONAPESCA, 2020)

**Top 10 en volumen de producción
Principales entidades**

| Rank | Entidad federativa | Región | Volumen (toneladas) | Variación (%) 2018-2019 |
|------|-----------------------|------------------|---------------------|-------------------------|
| | Total nacional | | 237,674 | 3.2 |
| 1 | Sinaloa | Noroeste | 96,568 | -8.0 |
| 2 | Sonora | Noroeste | 75,392 | 6.0 |
| 3 | Nayarit | Noroeste | 17,464 | -1.0 |
| 4 | Tamaulipas | Noreste | 15,636 | 3.1 |
| 5 | Baja California Sur | Noroeste | 11,496 | 138.4 |
| 6 | Campeche | Sur-Sureste | 6,798 | 32.7 |
| 7 | Colima | Centro-Occidente | 3,848 | -11.4 |
| 8 | Veracruz | Sur-Sureste | 3,592 | 24.2 |
| 9 | Chiapas | Sur-Sureste | 2,445 | 123.7 |
| 10 | Oaxaca | Sur-Sureste | 2,159 | 22.3 |
| | Resto | | 2,275 | 64.7 |

Figura 2.2. Top 10 de entidades con mayor producción de camarón (SIAP, 2020)

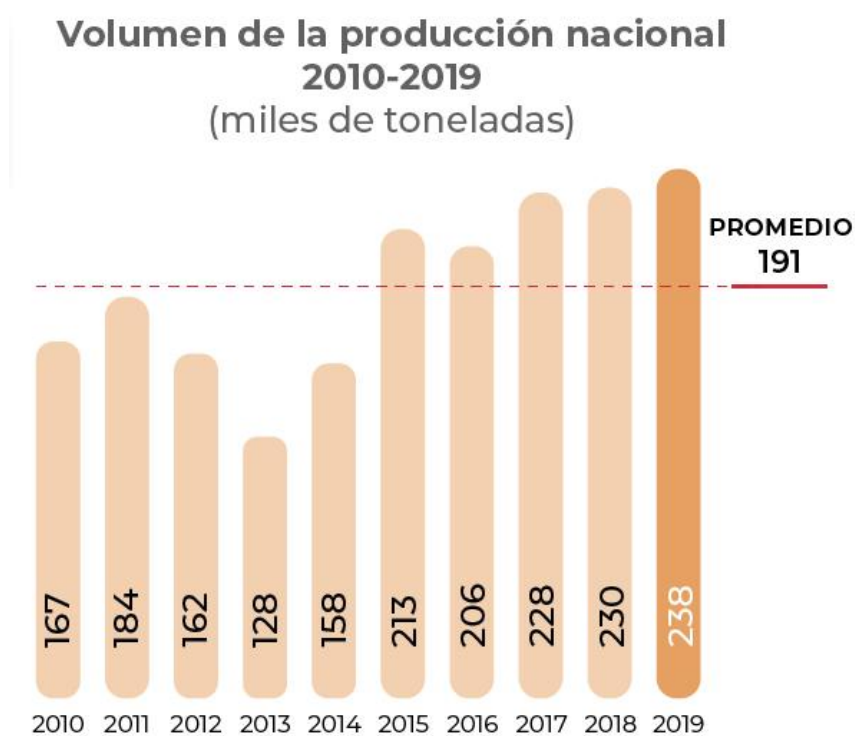


Figura 2.3. Producción nacional de camarón 2010-2019 (SIAP, 2020)

A lo largo de 5 años se ha mostrado un crecimiento en la producción total del crustáceo, lo cual proviene en su mayoría de la tendencia al alza que lleva la camaronicultura en el país, al punto en que en este año 2 de cada 3 camarones provenientes de México son por acuicultura. Para 2021 se estima que se producirán alrededor de 267,800 toneladas (CONAFAB, 2021) aunque poco se habla de los daños causados por los acuicultores a los humedales costeros ya que cuando tienen problemas abandonan los terrenos ‘muertos’ y continúan con la destrucción de los humedales más adelante (Carranza-Díaz, 2021).

2.1.2. Composición del camarón

La composición del camarón varía de especie a especie. Dentro de las especies de camarón presentes en México, la más estudiada es el camarón blanco. En la Tabla 2.1 se presentan las composiciones reportadas en diferentes estudios. La humedad promedio para *Litopenaeus vannamei* es de 74.54%, mientras que de proteína, lípidos y ceniza es de 17.70, 2.52 y 2.86%, respectivamente.

Tabla 2.1. Composición teórica reportada del camarón blanco

| Especie | Humedad (%) | Proteína (%) | Lípidos (%) | Ceniza (%) | Fuente |
|-----------------------------|-------------|--------------|-------------|------------|------------------------|
| <i>Litopenaeus vannamei</i> | 73.14 | 17.53 | 4.06 | 2.77 | Wang et al. (2020) |
| <i>Litopenaeus vannamei</i> | 76.06 | 16.79 | 2.74 | 3.23 | Wang et al. (2019) |
| <i>Litopenaeus vannamei</i> | 75.60 | 18.09 | 1.59 | 2.38 | Khanjani et al. (2020) |
| <i>Litopenaeus vannamei</i> | 73.90 | 18.40 | 1.69 | 3.06 | Wang et al. (2017) |

Al ser una composición completa se puede observar que el agua es el componente mayoritario, seguido por la proteína debido a que el abdomen es la parte blanda donde se encuentran los

órganos. La siguiente parte más abundante del crustáceo es el cefalotórax y el caparazón que contienen una amplia gama de minerales, lo que se refleja a través de la abundancia de las cenizas en la composición total.

A través del procesamiento del camarón se generan subproductos que engloban el cefalotórax, el caparazón y la cola, estos representan aproximadamente el 50% de todo el camarón y la mayor parte no son aprovechados sino desechados como residuos (Sarabia-Bañuelos et al., 2015). De esta cantidad, el 71.4% es representado por el cefalotórax (Sinthusamran et al., 2018).

El cefalotórax tiene una composición variada y los resultados de diversos estudios se pueden observar en el Cuadro 2.2. Como se puede observar, la parte mayoritaria se compone de agua, mientras que el segundo componente más abundante es la proteína. La proteína junto con los pigmentos son componentes del cefalotórax que pueden llegar a extraerse y comercializarse como suplementos o incluso añadirlos directamente en algunos alimentos. Como los cefalotórax normalmente están acompañados del caparazón y patas y cola se tiene más masa para extraer los pigmentos que pueden ser incluso nutracéuticos (Mendoza-Pérez et al., 2014).

Tabla 2.2. Composición teórica reportada del cefalotórax del camarón blanco

| Especie | Humedad (%) | Proteína (%) | Lípidos (%) | Ceniza (%) | Fuente |
|-----------------------------|-------------|--------------|-------------|------------|----------------------------|
| <i>Litopenaeus vannamei</i> | 75.86 | 9.24 | 2.73 | 2.49 | Sinthusamran et al. (2020) |
| <i>Litopenaeus vannamei</i> | 79.30 | 7.76 | 0.64 | 5.57 | Flores-Ortega (2008) |
| <i>Litopenaeus vannamei</i> | 77.53 | 9.63 | 1.59 | 2.38 | Tlelo-Bárcena (2021) |

2.1.2.1. Proteína

Las proteínas son biomoléculas que constan de una cadena de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos. Poseen diversas propiedades dentro de los seres vivos que van desde estructurales

hasta funcionales. Los hidrolizados de proteínas de los subproductos del procesamiento de productos del mar se han convertido en uno de los ingredientes potenciales para alimentos nutricionalmente funcionales y que promueven la salud debido a que contiene péptidos biológicamente activos así como aminoácidos esenciales (Sinthusamran et al., 2020). De igual manera, tienen una variedad de aplicaciones en diversas industrias, incluidas la farmacéutica, la nutrición humana, la alimentación animal o la cosmética. También son útiles como fuente de nitrógeno en los medios de cultivo para microorganismos (Bueno-Solano et al., 2009). Narayan et al. (2009) estudiaron el perfil de aminoácidos contenidos en los residuos del camarón tigre asiático (*Penaeus monodon*¹). Éstos contienen todos los aminoácidos esenciales excepto treonina, lo cual se refleja en la gran calidad biológica que tiene esta proteína, reflejándose directamente en propiedades nutricionales.

2.1.2.2. Quitina

La quitina es un aminopolisacárido compuesto por unidades de β -(1,4)-D-glucosamina. Es el segundo carbohidrato más abundante en la naturaleza, formando parte de los exoesqueletos de crustáceos, insectos y otros artrópodos, así como en las paredes celulares de algas y hongos (Figura 2.4).

Zargar et al. (2015) reportaron los diversos usos de la quitina y sus derivados. Estos engloban aplicaciones en medicina y farmacia, uso como biomaterial, tratamiento en quemaduras y heridas, en ingeniería de tejidos, aplicaciones farmacéuticas, aplicaciones en agricultura, aplicaciones en alimentos y nutrición, uso en cosméticos, uso como piel artificial, en oftalmología, en ingeniería de agua recuperando metales y en ósmosis inversa, así como en pervaporación, entre otros.

También puede aprovecharse para producir sustitutos del polímero sintético llamado en México, 'unicel', un polímero espumado del estireno muy contaminante (Arias-Torres et al., 2013; Flores et al., 2006, 2007; Ortega-Granados et al., 2015a,b; Ortega-Granados y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2014; Tomás-Reyes et al., 2015). Y, naturalmente, además de las

¹ Por un error tipográfico en el artículo aparece como *P. mondon* en vez de *P. monodon* (nota de la tutora)

esponjas, pueden producirse películas que se aprovecharían no solamente como envolturas para alimentos en general sino para proteger frutas de manera individual de plagas u hongos como *Botrytis cinereus* al recubrirlas con la quitina disuelta en mezclas de metanol-agua-cloruro de calcio, patentado como MAC-141 © (Barrera-Rodríguez et al., 2006; Cañipa-Morales et al., 1994; Flores-Ortega et al., 2004), de las que hay numerosos estudios (García-Luna-Pérez et al., 2019; García-Montiel et al., 2016, 2018; José-González et al., 2016; Nava-Arévalo et al., 2016; Ortega-Granados, 2011; Ortega-Granados et al., 2014; Vargas-Cid et al., 2019; Velázquez-Solís et al., 2019). Y, por último, sus usos como adsorbente, tanto en la química analítica fina (Borja-Urzola et al., 2021) como para retener compuestos químicos tóxicos como los herbicidas (Borja-Urzola et al., 2020a,b) o indeseables como en jugos de caña (Durán-Olvera et al., 2016).

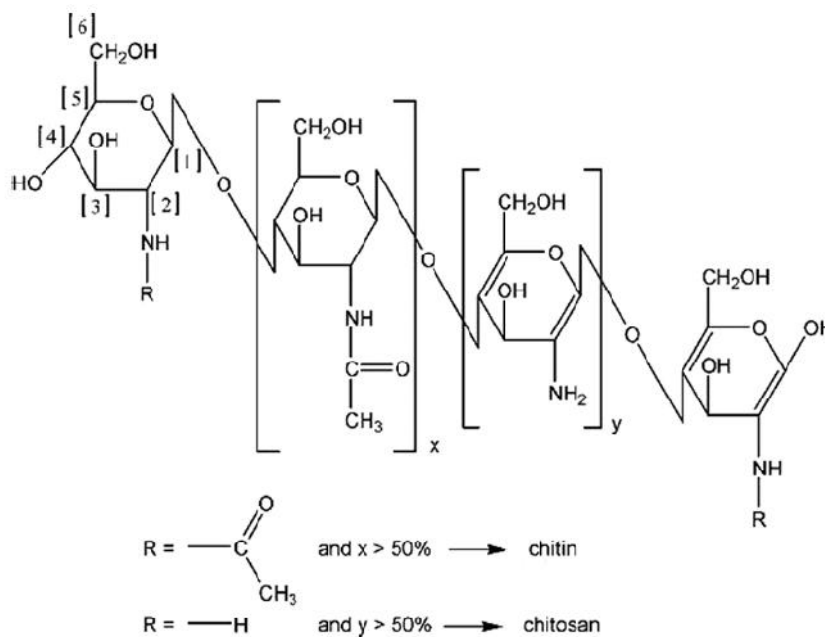


Figura 2.4. Estructura de la quitina y quitosana (Khor y Lim, 2003)

2.1.2.3. Pigmentos

Los carotenoides son pigmentos solubles en grasa y pueden ser extraídos de los residuos generados en el tratamiento de camarones. Químicamente son moléculas de 40 átomos de carbono formadas por 8 unidades de isoprenos que se unen de manera secuencial hasta que se

invierte en el centro de la estructura. Dependiendo de los elementos presentes en los carotenoides, estos se pueden dividir en carotenos y xantofilas, donde los primeros contienen únicamente carbono e hidrógeno mientras que las xantofilas contienen igualmente oxígeno (Meléndez-Martínez et al., 2007).

Los pigmentos carotenoides juegan un papel importante en la función fisiológica y también dan un color rosado-anaranjado característico a los camarones. La astaxantina es el principal carotenoide, representando del 75 al 95% del pigmento total que se encuentra en el caparazón de los crustáceos (Nirmal et al., 2020).

Los carotenoides son los pigmentos más abundantes en la naturaleza, presentes en prácticamente todos los organismos. En los crustáceos, los carotenoides como la astaxantina, se encuentran formando complejos con las proteínas y son responsables del color de los animales y de diversos organismos biológicos. Estos pigmentos son aditivos adecuados agregados a los alimentos para aves, como los flamencos en cautiverio y peces como los salmones, las truchas y hasta robalos capturados en el Golfo de México (Gutiérrez-Cabello et al., 2009) y se han utilizado como suplementos dietéticos y para la salud de seres humanos (Cahú et al., 2011; Donoso et al., 2021).

Industrialmente, los carotenoides han tomado relevancia en debido a la amplia evidencia que existe demostrando que tienen acción ante las especies reactivas de oxígeno. Dado lo anterior, se han comenzado a usar estos compuestos como un suplemento en productos alimenticios brindándoles un valor agregado. Por otro lado, la industria farmacéutica y cosmética han encontrado también maneras de suministrar carotenoides con la finalidad de evitar el estrés oxidativo y, a su vez, prevenir enfermedades crónicas como el Parkinson (Barreiro, 2018). Debido a estos beneficios, dentro de la industria química se trata de sintetizar carotenoides para poder tener sus propiedades funcionales sin tener que recurrir a fuentes naturales y, por lo tanto, disminuyendo lo costos. Habría que evaluar la pertinencia del uso de estos compuestos sintéticos ya que se ha demostrado con muchos ejemplos que no son como los naturales y que pueden causar daños al metabolismo del ser humano o de sus huéspedes, la microbiota intestinal (Reynoso-Amado et al., 2021).

2.2. Astaxantina

La astaxantina es un pigmento carotenoides color rojo-naranja de 40 carbonos perteneciente a las xantofilas, posee dos centros quirales, por lo que tiene tres estereoisómeros (Figura 2.5).

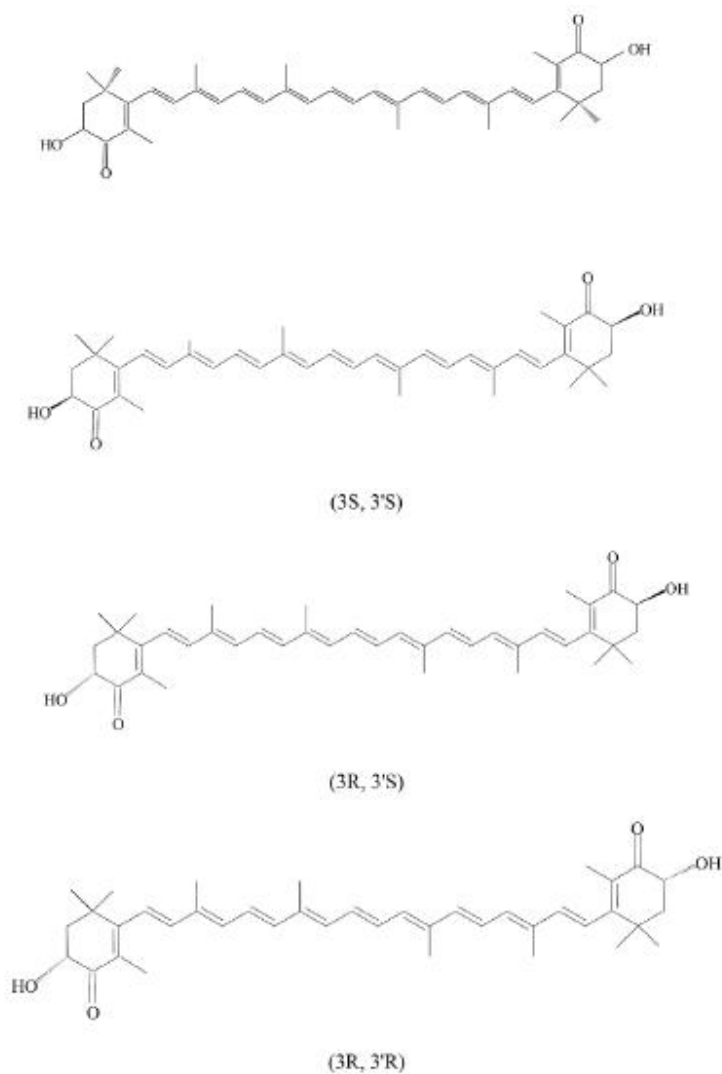


Figura 2.5. Estructura molecular de la astaxantina y estereoisómeros (Zhao et al., 2019)

La molécula posee dos estructuras cíclicas separadas por una cadena con dobles enlaces conjugados que le brindan una amplia cantidad de características que la hacen una sustancia con aplicaciones bioquímicas especiales. Dada a su amplia cantidad de carbonos, su naturaleza

es mayormente hidrofóbica; sin embargo, los grupos hidroxilo y cetona brindan una ligera sección hidrofílica (Zhao et al., 2019). Es un compuesto que se presenta en la naturaleza en diversas especies, principalmente se da en crustáceos, algas e incluso algunas aves y peces (Mendoza-Pérez, 2014). En el caso de salmón y camarón se ha demostrado que no solamente forma parte de la pigmentación sino que es esencial para su supervivencia (Luna-Rodríguez, 2003). En los seres vivos se presenta esterificado con otros ácidos grasos ya que de esta manera es menos inestable (Zhao et al., 2019).

Actualmente, la astaxantina es muy utilizada en la acuicultura debido a su necesidad, tanto para la supervivencia de las especies cultivadas, como para lograr la coloración deseada por los consumidores en el producto final (Luna-Rodríguez et al., 2008). Por otro lado, debido a los beneficios que ha demostrado tener para la salud, ha comenzado a comercializarse como un nutracéutico de consumo humano (Donoso et al., 2021). Finalmente, puede ser igualmente utilizado como colorante en productos alimenticios (Romero-Olmos, 2019). Todas estas funcionalidades hacen de la astaxantina un compuesto cuya comercialización se ha visto incrementada a lo largo de los años. Tan sólo en 2014 el mercado de la astaxantina ya se estimaba en \$447 millones de dólares estadounidenses y se proyecta que para 2022 esto aumente a \$800 millones (Routray et al., 2019).

Las algas son los principales organismos de los que se extrae la astaxantina. Sin embargo, debido a las amplias cantidades en las que se encuentra en los caparazones de crustáceos que son mayormente desechados, su extracción de los mismos puede llegar a ser ampliamente rentable, ayudando a la industria de la pesca y cultivo de crustáceos.

2.2.1. Propiedades de la astaxantina

Debido a su estructura, la astaxantina tiene una gran cantidad de propiedades benéficas para el ser humano. La mayoría de estos beneficios están dados tanto por la capacidad antioxidante como por la estructura que presenta la molécula. La parte central de la molécula con los dobles enlaces conjugados permite donar electrones para neutralizar radicales libres y parar la serie de reacciones en cadena que se originan. De igual manera, el hidrógeno del metino del C3

sirve para neutralizar radicales libres ya que puede donarse fácilmente. Los anillos inicial y final de la astaxantina poseen grupos hidroxilo y cetona, que le dan características que no tienen otros grupos carotenoides. El tener tanto carácter hidrofílico como lipofílico, permite que la molécula pueda pasar a través de la membrana celular aumentando la capacidad de acción en comparación con otros antioxidantes como la vitamina C o el β -caroteno. La absorción de la astaxantina se da como cualquier carotenoide, a través de difusión pasiva entra al epitelio intestinal, asimilándose posteriormente con las lipoproteínas y transportándose por el sistema circulatorio hacia los tejidos (Donoso et al., 2021).

La piel es el órgano más grande del cuerpo humano, así como el más expuesto al ambiente, provocando que se generen problemas. El foto-envejecimiento es un fenómeno que se da en la piel debido a la generación de especies reactivas de oxígeno, generando daños tales como la presencia de arrugas, oscurecimiento, aparición de manchas e incluso la aparición de cáncer de piel. Los carotenoides han sido estudiados debido a su acción antioxidante para la disminución de daño a la piel demostrando tener un efecto significativo en ello. La astaxantina no solamente presenta acción antioxidante, sino que también brinda efectos antiinflamatorios, efectos de reparación del ADN, efectos de mejoramiento de la respuesta inmune y supresión de daños debidas a metaloproteinasas (Padel et al., 2013).

Los ojos son un órgano ampliamente afectado a lo largo del tiempo por el daño oxidativo, causando enfermedades como degeneración macular debido a la edad, cataratas, uveítis, retinopatía, inflamación de la córnea y queratitis. Dada la estructura de la astaxantina, esta ha demostrado tener un efecto protector a las células epiteliales del ojo ante el estrés oxidativo (Snodderly, 1995).

Las enfermedades cardiovasculares son la principal causa de morbilidad y mortalidad a nivel mundial. Estas enfermedades incluyen daño en los vasos sanguíneos, accidentes cerebrovasculares, enfermedad coronaria del corazón, enfermedad arterial periférica, cardiopatía congénita y falla cardíaca. Las especies reactivas de oxígeno son responsables de las fisiopatologías de diversas cardiopatías debido a las modificaciones que generan en las lipoproteínas de baja densidad. La astaxantina ha demostrado tener efectos de prevención y

tratamiento ante estas enfermedades debido a que disminuye la presión, reduce las citosinas pro-inflamatorias y mejora la sensibilidad a la insulina (Gammone et al., 2015).

Debido a la amplia necesidad de oxígeno en el cerebro, las células lipídicas son susceptibles a sufrir oxidación y, a su vez, a limitar la regeneración celular. La actividad antioxidante de la astaxantina logra ralentizar los efectos de las enfermedades neurodegenerativas como Alzheimer o Esclerosis amiotrófica lateral. Por otro lado, también juega un rol importante en la reparación celular ya que tiene un sistema de reparación del ADN evitando así mutaciones y disfunciones en la mitocondria (Lakey-Beitia et al., 2019).

Finalmente, como nutraceutico también ha mostrado tener un efecto en el mejoramiento de la respuesta inmune como se ha demostrado en diversos estudios como los realizados por Andersen et al. (2007), donde se observó un aumento en las células T después de suplementar 40 mg de astaxantina diariamente.

2.2.2. Métodos de extracción de la astaxantina

Debido a la importancia que tiene la astaxantina en la acuicultura y a las importantes propiedades que ha demostrado tener como nutraceutico, se están buscando diferentes maneras de extraerla de las diferentes fuentes naturales.

Entre los diferentes métodos de extracción que se han desarrollado se encuentran la extracción con solventes químicos, la extracción con aceites de origen natural, la hidrólisis enzimática, la extracción con fluidos supercríticos y nuevas tecnologías físicas como ultrasonido o microondas. La combinación de varios de estos métodos aumenta significativamente el rendimiento (Mendoza-Pérez et al., 2014).

Es posible usar métodos como la ultrafiltración cuando se trata de extraer la astaxantina de agua de cocimiento de crustáceos ya que esta está asociada con las proteínas de alta masa molecular. De igual manera, puede ser únicamente un pretratamiento para concentrar la

cantidad de astaxantina en agua de cocimiento para así ahorrar energía y solventes. A pesar de estas ventajas, este procedimiento solamente puede ser utilizado en medio líquido.

Otros métodos físicos como la extracción asistida por campo magnético, la extracción asistida por ultrasonido, la extracción asistida por microondas y la extracción mediante equipos Soxhlet, son fácilmente combinables con métodos convencionales ayudando a mejorar el rendimiento global de la extracción. Por ejemplo, Ruen-Ngam et al. (2011) demostraron cómo se aumenta significativamente la recuperación de la astaxantina con acetona en un menor tiempo, aumentando el rendimiento y disminuyendo los residuos generados por la extracción.

Para la extracción con solventes, debido a las propiedades anfifílicas que posee la astaxantina, se puede realizar con una amplia variedad de solventes. Acetona, metanol, alcohol isopropílico, éter de petróleo, hexano, dicloro metano, acetonitrilo y etanol, son los solventes orgánicos más comúnmente usados, aunque también se han usado componentes inorgánicos como el ácido sulfúrico. Los resultados han mostrado que la acetona (Ruen-Ngam et al., 2011) así como la mezcla alcohol isopropílico hexano (1:1) (Sachindra et al., 2006), han mostrado tener los mejores rendimientos. Sin embargo, estos solventes son volátiles, con bajo punto de ebullición y poseen toxicidad media, por lo que pueden causar problemas en la seguridad y salud. Cabe destacar que para esta clase de extracción, hay factores tales como el tiempo, la proporción solvente:residuo y la temperatura ya que estas permiten aumentar el rendimiento de recuperación de astaxantina. Obviamente, también deben cuidarse ya que altas temperaturas pueden llegar a dañar la estructura molecular de la astaxantina (Romero-Olmos, 2019).

En cuanto a la extracción con aceites comestibles, esto tiene ventajas y desventajas. Por un lado, la astaxantina se puede absorber más fácilmente cuando se emplean aceites comestibles, también evita la oxidación del compuesto durante el almacenamiento y provee un mayor aporte nutricional brindando los beneficios que cada uno de ellos ofrece como los ácidos grasos poliinsaturados. A pesar de ello, es necesario aumentar la temperatura para mejorar la recuperación de astaxantina con los aceites. De igual manera, no es sencillo concentrar los pigmentos contenidos en los aceites. Los aceites más utilizados para esto son aceites de

girasol, de oliva, de linaza, de coco, de palma y de arroz. Los que dieron mejores rendimientos fueron el aceite de girasol, el de coco y el de linaza (Pu et al., 2010; Sachindra y Mahendrakar, 2005).

Los fluidos supercríticos tienen propiedades que los hacen ideales para la extracción de astaxantina tales como alta compresibilidad, menor viscosidad y alta difusividad. Pueden ser usados a temperaturas menores que las que se requerirían en una extracción normal. A pesar de ello, el poder usar esta tecnología amigable con el ambiente eleva los costos debido a las altas presiones que deben mantenerse para tener el fluido en estado líquido y en su mayoría requieren de liofilización como pretratamiento. Los resultados usando CO₂ supercrítico no son tan buenos comparados con los de solventes tradicionales; sin embargo, el uso de co-solventes como el etanol aumentan el rendimiento a la par de los métodos anteriormente mencionados (Roy et al., 2020).

La hidrólisis enzimática es un procedimiento que mejora ampliamente la estabilidad de la astaxantina ya que usan las proteínas como enlace para evitar su degradación debido a que se mantiene el complejo caroteno lipoproteína. De igual manera, esta metodología se considera amigable con el ambiente por evitar la generación de residuos contaminantes, así como la reducción de tiempo y energía requerida. En su mayoría, la hidrólisis enzimática se usa como pretratamiento para posteriormente hacer una extracción por disolventes, esto es mayormente utilizado cuando se quiere separar la quitina como lo hicieron Auerswald y Gäde (2008).

La biotransformación de residuos de crustáceos con cultivos ácido lácticos permite la correcta remoción de proteínas y minerales, aumentando la eficiencia de extracción. De igual manera, este proceso crea un licor rico en carotenoides que permite estabilizar la molécula de astaxantina así como aumentar su tiempo de almacenamiento hasta por 75 días. Por otro lado, también este proceso puede ser usado como pretratamiento global sustituyendo a varias operaciones como la desmineralización o desproteínización. Aunque los beneficios son amplios, se requiere del control de muchos factores como el pH, el cultivo iniciador, el tiempo de biodegradación, el carbohidrato usado como sustrato y la calidad de los residuos a biodegradar.

2.3. Softwares de simulación de procesos

Un software de simulación es una herramienta que permite imitar procesos reales de manera ideal, permitiendo al(a) investigador(a) dilucidar cuál será el comportamiento del mismo sin realizar experimentos. Su principal objetivo es ayudar en diferentes ámbitos como son la investigación, el diseño y la propia simulación de un sistema.

Los procesos ingenieriles tienen que lidiar con dos tareas: Diseñar nuevos procesos y simular procesos existentes. Estas tareas pueden ser simples o muy complejas. En el caso de que sean sencillas, el uso del cálculo manual permite una comprensión completa del proceso. Por otra parte, cuando se trata de un proceso más complejo, el cálculo manual se vuelve muy complicado. Por ello, en este momento los softwares de simulación se vuelven una herramienta sumamente útil (Haydary, 2019).

Los softwares de proceso son excelentes herramientas para realizar diagramas de flujo de proceso de alta calidad, así como diagramas de procesos e instrumentos. Ambos son documentos ampliamente usados en la Ingeniería Química debido a que éstos dan información acerca de los balances de materia y energía, así como detalles del equipo, los controles, los instrumentos y las líneas respectivamente (Schefflan, 2011).

Dentro de las capacidades que poseen los softwares de simulación se incluye una descripción precisa de las propiedades físicas de los componentes puros y mezclas complejas, modelos rigurosos para operaciones unitarias, así como técnicas numéricas avanzadas para poder resolver grandes sistemas de ecuaciones algebraicas y diferenciales (Segovia-Hernández y Gómez-Castro, 2017).

Dentro de las ventajas de los softwares de simulación está la de que permite hacer evaluaciones de simulaciones y retroalimentación del proceso, desarrollando diseños óptimos e integrados, minimizando la necesidad de experimentación para el escalamiento, explorando la flexibilidad

y sensibilidad del proceso, modelando cuantitativamente los procesos y arrojando información sobre el rendimiento.

2.3.1. Aspen Plus®

El software de simulación Aspen Plus® está diseñado para simular procesos de estado estable, sobre todo aquellos que son demandantes para realizar los cálculos a mano, lo que lo hace apropiado para experimentar con las condiciones de los procesos y responder: “¿Qué pasaría si ... ?”

Aspen Plus® predice el comportamiento del proceso usando relaciones de ingeniería como los balances de materia y energía, los equilibrios químicos y de fases y la cinética de reacción. Con propiedades físicas confiables, datos termodinámicos, condiciones realistas de operación y modelos de equipos rigurosos, los ingenieros pueden simular comportamientos de una planta real o diseñar una nueva.

Dentro de las funciones de Aspen Plus® se tienen mejoras en la productividad y reducción de costos, reducción del consumo de energía y de la emisión de gases de efecto invernadero, mejora en los rendimientos de producción y de calidad, minimizando el capital y los costos operativos y optimizando las operaciones de la planta.

A continuación en el siguiente capítulo se presenta la metodología seguida en esta investigación.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

Este trabajo de investigación se dividió en tres partes. En la primera de ellas se realizó una búsqueda bibliográfica para conocer los métodos reportados para la extracción de astaxantina a partir de subproductos, mal llamados residuos, de camarón, tanto en artículos científicos como en tesis y libros. La segunda parte consistió en el análisis de la información recopilada a través de un cuadro comparativo para determinar los procesos a simular. Finalmente, se realizó la simulación del mejor proceso utilizando los softwares Aspen HYSYS® y Aspen Plus® para conocer la cantidad de productos a obtener con una base de cálculo real, así como un estimado de los costos de operación de una Planta Piloto cuyo objetivo será corroborar la bondad de la propuesta tecnológica.

3.1. Revisión bibliográfica

Utilizando la Biblioteca Digital de la UNAM, conocida como BIDI, se buscaron artículos recientes sobre las tecnologías y métodos utilizados para la extracción de astaxantina reportados, principalmente enfocados en la recuperación a partir de subproductos de camarón. Por otra parte, también se usó la base de datos de tesis de la UNAM, TESIUNAM, para revisar las tesis realizadas sobre la extracción de astaxantina a partir de subproductos de camarón, poniendo especial atención en los métodos usados, con las siguientes palabras clave: astaxantina + camarón + residuos (ya que así se conocen aunque sean realmente subproductos).

En las redes internacionales se usaron las siguientes palabras clave para acceder al resto del mundo: En inglés: *astaxanthin + shrimp + waste* y en español: astaxantina + camarón + residuos.

De la búsqueda se recopilaron >100 artículos, 10 tesis y 1 trabajo de educación continua, así como varios libros.

Una vez obtenida la información escrita recopilada en los bancos de documentos, se analizó y discriminó, tomando en cuenta la especie de camarón de la que provenían los residuos, si se realizó algún pretratamiento y el método de extracción utilizado.

Con la información anterior se hizo un cuadro comparativo donde aparecen los resultados obtenidos en cada uno de los casos (entendidos como el rendimiento de extracción de la astaxantina).

La Figura 3.1 presenta el cuadro sinóptico de toda la información acopiada al respecto ejemplificando con al menos una de las referencias revisadas.

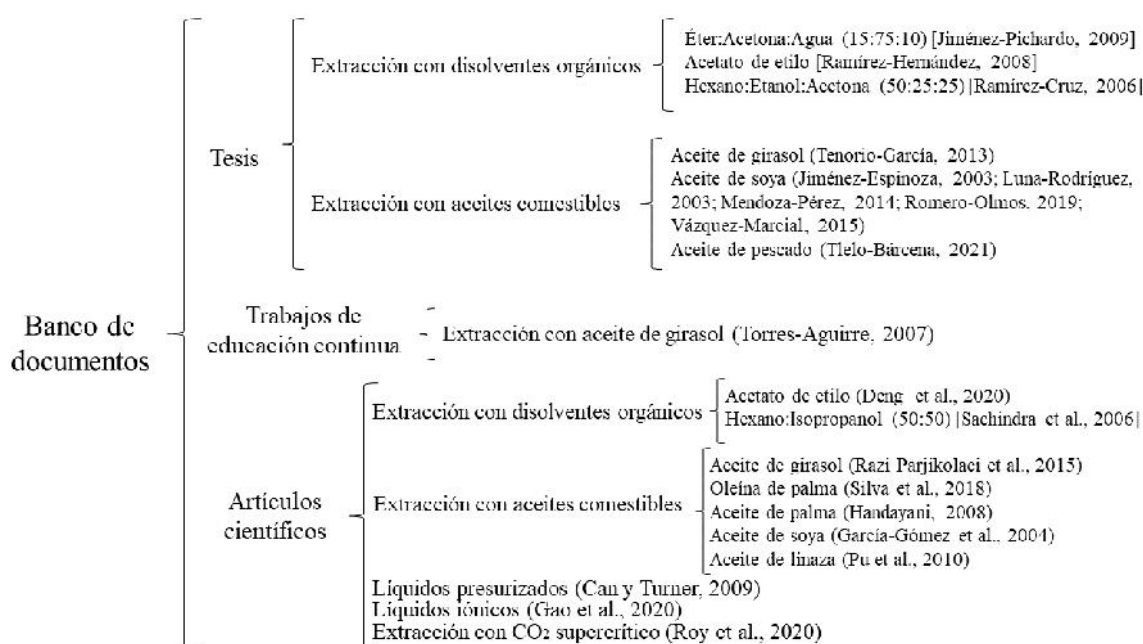


Figura 3.1. Organización de la información recopilada a través de la búsqueda bibliográfica

En la Tabla 3.1 se muestran resumidos los experimentos reportados en los diversos documentos recopilados y leídos para este trabajo.

Tabla 3.1. Resumen tomando como ejemplo algunos de los documentos revisados sobre la extracción de astaxantina de crustáceos

| Tipo de crustáceo | Método de extracción | Pretratamiento de la materia prima | Condiciones | Rendimiento (μg extraídos/g residuo) |
|---|--|---|---|--|
| Tesis | | | | |
| <i>Penaeus aztecus</i> | Extracción con aceite de girasol (Tenorio-García, 2013) | Desmineralización | Aceite de girasol 80°C, 15 minutos | 24.39 \pm 5.99 |
| <i>Litopenaeus vannamei</i> | Extracción con disolventes orgánicos (Jiménez-Pichardo, 2009) | Ensilado químico con ácido fórmico-ácido acético (4%/4%) | Éter:Acetona:Agua (15:75:10) 15000 rpm, 15 min 200 rpm, 3 horas | 4.60 |
| <i>Penaeus vannamei</i> | Extracción con disolventes orgánicos (Ramírez-Hernández, 2008) | Fermentación con <i>Lactobacillus sp.</i> 48 horas | Acetato de etilo 25 minutos | 568.8 |
| <i>Litopenaeus vannamei</i> | Extracción con aceite de soya (Romero-Olmos, 2019) | Desmineralización | Aceite de soya 80°C, 20 minutos | 1270.31 \pm 37.20 |
| <i>Penaeus vannamei</i> y <i>Penaeus aztecus</i> | Extracción con disolventes orgánicos (Ramírez-Cruz, 2003) | Uso de enzima quitinolítica de <i>Serratia marcescens</i> | Hexano:Etanol:Acetona (50:25:25) Agitación, 5 minutos | 99.57 |
| <i>Penaeus aztecus</i> y <i>Penaeus setiferus</i> | Extracción con aceite de soya (Luna-Rodríguez, 2003) | Desmineralización | Aceite de soya 1:10, 80°C, 15 minutos | 642.60 |
| <i>Penaeus aztecus</i> | Extracción con aceite de soya (Jiménez-Espinosa, 2003) | Desmineralización | Aceite de soya 1:10, 80°C, 15 minutos | 25.90 \pm 0.71 |
| <i>Callinectes sapidus</i> | Extracción con aceite de soya (Mendoza-Pérez, 2014) | Secado y molienda de los caparazones | Aceite de soya 1:10, 200 rpm, 80°C, 20 minutos | 30.52 \pm 0.11 |
| <i>Farfantepenaeus aztecus</i> | Extracción con aceite de pescado (Tlelo-Bárcenas, 2021) | Desproteínización parcial con agua | Aceite de pescado 2:1, 80°C, 15 minutos | 36.71 \pm 0.01 |
| <i>Callinectes sapidus</i> | Extracción de aceite de soya (Vázquez-Marcial, 2015) | Secado y molienda de los caparazones | Aceite de soya 1:75, 200 rpm, 80°C, 20 minutos | 66.01 \pm 2.44 |
| Trabajos de educación continua | | | | |
| Residuos de camarón | Extracción con aceite de girasol (Torres-Aguirre, 2007) | Homogeneización con agua destilada | Aceite de girasol 1:3.2, 20°C, 120 minutos | 427.84 |
| Artículos | | | | |
| <i>Litopenaeus vannamei</i> | Extracción con disolventes (Deng et al., 2020) | Recuperación enzimática de quitina y proteína | Acetato de etilo | 101.30 \pm 5.4 |
| No identificado | Extracción con líquidos presurizados (Can y Turner, 2009) | Molienda | Etanol 80°C, 60 bar 15 minutos | 24.26 \pm 4.3 |

Tabla 3.1. Resumen tomando como ejemplo algunos de los documentos revisados sobre la extracción de astaxantina de crustáceos

| Tipo de crustáceo | Método de extracción | Pretratamiento de la materia prima | Condiciones | Rendimiento (µg extraídos/g residuo) |
|--|---|--|--|---|
| <i>Penaeus indicus</i> | Extracción con disolventes (Sachindra et al., 2006) | Homogeneización | Hexano:isopropanol (50:50) | 43.93± 0.7 |
| <i>Pandalus borealis</i> | Extracción con aceite (Razi-Parjikolaei et al., 2015) | Homogeneización | Aceite de girasol Ester metílico del aceite de girasol | 23.10± 2.3 |
| <i>Penaeus vannamei</i> | Extracción asistida por ultrasonido utilizando microemulsiones de líquidos iónicos en agua (Gao et al., 2020) | Liofilización | Microemulsiones a base de líquido iónico [P ₄₄₄₈] Br, TX-100, n-butanol y agua Ultrasonido | 32.47 ± 0.24 |
| <i>Peneaus monodon</i> | Extracción con CO ₂ supercrítico (Roy et al., 2020) | Liofilización | Adición de piel de <i>Scomberomous niphonius</i> | 48.20 ± 0.15 |
| <i>Farfantepenaeus subtilis</i> | Extracción con aceite (Silva et al., 2018) | Secado en un secador de lecho fluidificado | Oleína de palma | 31.30 ± 0.26 |
| <i>Peneaus monodon</i> | Extracción con aceite de palma (Handayani et al., 2008) | Liofilización | Aceite de palma 1:6, 70°C, 120 minutos | 131.74 |
| <i>Peneaus aztecus</i> y <i>Peneaus vannamei</i> | Extracción con aceite de soya (García-Gómez et al., 2004) | Desmineralización | Aceite de soya 1:10, 80°C, 3x 15 minutos | 35.86 ± 0.72 |
| <i>Litopenaeus setiferus</i> | Extracción con aceite de linaza (Pu et al., 2010) | Molienda | Aceite de linaza 60°C, 60 minutos | 48.3 ± 1.80 |

3.2. Análisis de la información

Se realizó un análisis de la Tabla 3.1 para poder seleccionar el proceso a partir del cual se calculan los balances de materia de cada operación unitaria del proceso seleccionado con ayuda del software Aspen Plus®.

En la Tabla 3.1 se resumen los rendimientos de extracción dependiendo, tanto del método como del tratamiento dado a la materia prima previa a la extracción. Al comparar los resultados se apreció que la extracción realizada por Romero-Olmos (2019) es la mejor metodología analizando el rendimiento. Teniendo en consideración los preceptos de la química verde para producir la menor cantidad de residuos posibles y no generar un impacto

directo al ambiente, el uso de un aceite vegetal es una opción viable ya que este no solamente ayuda a extraer, sino que también brinda un valor agregado al producto final recuperado. De igual manera, se minimiza la cantidad de sustancias liberadas al ambiente y a su vez minimiza el costo de los insumos requeridos para la extracción. Por otra parte, el proceso realizado en este trabajo es relativamente sencillo, lo cual lo hace sumamente viable y fácilmente escalable. Dados los diversos usos que se le puede dar a un aceite pigmentado y el hecho de que su composición determinará el precio, se eliminará el paso de desmineralización del procedimiento original. En la Figura 3.2 se presenta el diagrama de bloques de la metodología propuesta para obtener pigmentos carotenoides ricos en astaxantina a partir de subproductos de camarón.

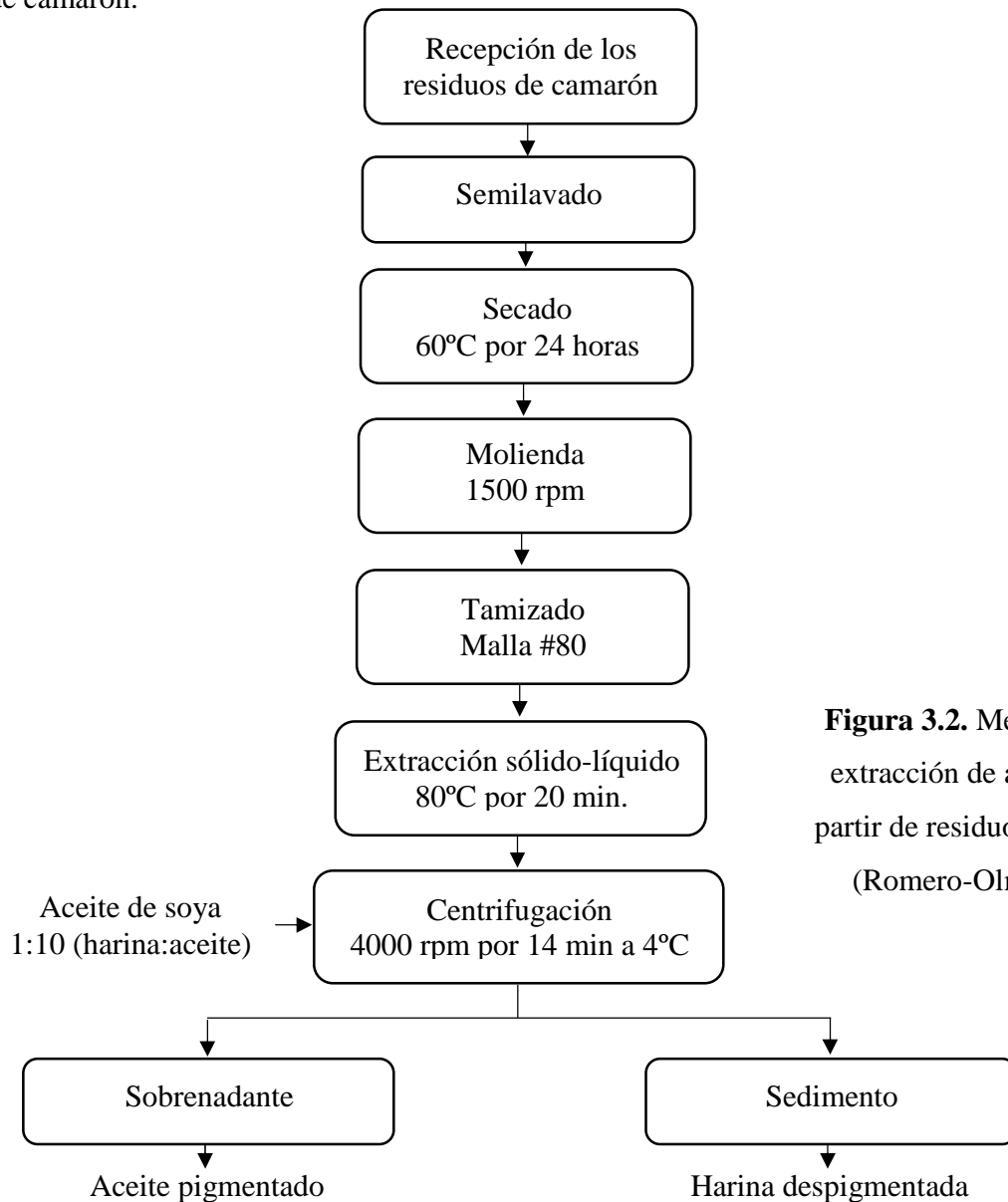


Figura 3.2. Metodología de extracción de astaxantina a partir de residuos de camarón (Romero-Olmos, 2019)

3.3. Simulación computacional del proceso

Como se mencionó anteriormente, para realizar la simulación de los procesos a nivel de Planta Piloto se utilizó el software Aspen Plus®. Aspen Plus® permitió llevar a cabo los balances de materia en cada una de las operaciones unitarias necesarias para completar el proceso de separación.

Con los resultados reportados en las investigaciones seleccionadas para simular se determinaron los componentes a ingresar en los programas. De acuerdo con la composición de los residuos de camarón (cefalotórax y exoesqueleto), se ingresó humedad (como agua), proteínas (como ácido glutámico), quitina (como D-N-acetilglucosamina), grasa (como palmitato de metilo), cenizas (como carbonato de calcio) y fibra (como D-N-acetilglucosamina). Como componentes adicionales se incluyeron aire y aceite de soya (como ácido linoleico debido a que éste es el más abundante en el aceite de soya [Lafont et al., 2014]). Estos últimos siendo necesarios para las operaciones de secado y extracción.

Una vez colocados los componentes, se eligió el método termodinámico que permitiera realizar los cálculos correspondientes para obtener los balances de materia y energía. En este caso se emplearon los métodos no aleatorios para dos líquidos con electrolitos acoplados con Redlich-Kwong (*Electrolite Non-Random-Model of Two Liquids, ENRTL-RK*, por sus siglas en inglés) y Soave-Redlich-Kwong (*SRK*, por sus siglas) para la simulación de las operaciones unitarias en Aspen Plus®.

Para la simulación del proceso se eligió dividirlo por operaciones unitarias para poder obtener los datos de una manera más precisa y sin sobrecargar los programas. Para cada una de las etapas se escogió el equipo correspondiente para su simulación. Luego, se colocaron las corrientes de materia y energía necesarias para cada unidad, especificando el flujo, la temperatura, la presión y la composición.

En cuanto a la determinación de flujo de residuos de camarón a utilizar en la simulación, se hizo un estimado de lo que se podría manejar en una Planta Piloto tomando en cuenta la

producción anual de camarón más recientemente publicada. CONAPESCA (2020) reporta un volumen de producción de 47 mil 664 toneladas, donde el estado de Sinaloa fue el mayor productor con 19 mil 551 toneladas de camarón, por lo que este sería el sitio ideal para que se colocara la Planta Piloto. Para el cálculo se toma en cuenta que el cefalotórax y el exoesqueleto del camarón comprenden alrededor del 43% en masa (Deng et al., 2020) y que solamente una cuarta parte de estos residuos se podrán recuperar debido al tipo de comercialización del camarón (Melo y Ortega, 2016). Aplicando lo anterior a la cantidad reportada de camarón producido se obtiene un flujo de 700 kg/h. Las operaciones aritméticas se muestran a continuación:

$$19,551 \text{ ton/año} * 0.43 = 8,406.93 \text{ ton/año}$$

$$\frac{8,406.93 \text{ ton/año}}{4} = 2,101.73 \text{ ton/año}$$

$$\frac{2,101.73 \text{ ton/año}}{365 \text{ día/año}} = 5.76 \text{ ton/día} = 5,758.17 \text{ kg/día}$$

$$\frac{5,758.17 \text{ kg/día}}{8 \text{ h/día}} = 719.77 \text{ kg/h} \sim 700 \text{ kg/h}$$

Finalmente, se accionó el programa para obtener los balances de materia a partir de los flujos y composiciones obtenidos para cada uno de los equipos. De igual manera, habiendo concluido lo anterior, se corrió el análisis económico para conocer el capital requerido para la instalación de la Planta Piloto, así como hacer el estimado de los costos (Figura 3.3).

Todos los métodos de cálculo se presentan en anexos al final de este documento.

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos y se discuten con base en el objetivo de esta investigación.

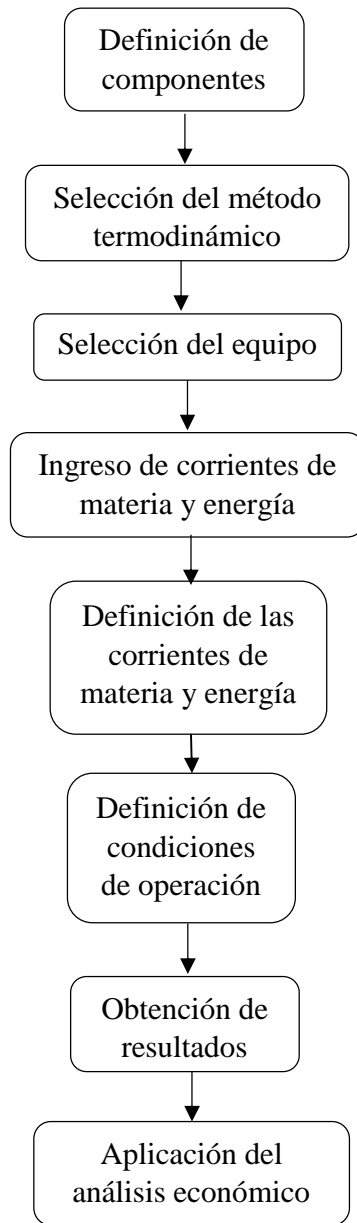


Figura 3.3. Metodología para la simulación de equipos en los programas de Aspen Tech

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Simulación del proceso

4.1.1. Flujos y composiciones de las corrientes

Los resultados de los flujos y las composiciones calculadas a través de las simulaciones de los equipos, así como la relación de los mismos, con sus respectivas claves y diagramas de proceso, se muestran de manera lógica con respecto del proceso en las Tablas 4.1 al 4.7.

Tabla 4.1. Relación de equipos y claves en el simulador Aspen Plus®

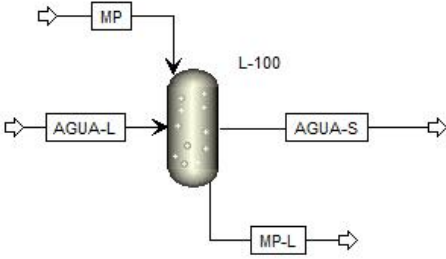
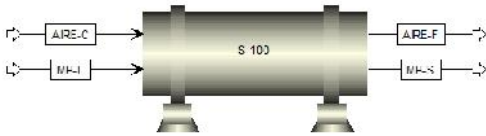
| Equipos | Clave | Equipos encontrados en la paquetería de Aspen Plus | Corrientes |
|---------|-------|--|--|
| Lavador | L-100 |  | AGUA-L->Agua de entrada MP->Materia Prima AGUA-S->Agua de salida MP-L->Materia Prima Limpia |
| Secador | S-100 |  | AIRE-C-> Aire tibio y seco MP-L->Materia Prima Limpia AIRE-F-> Aire frío y húmedo |

Tabla 4.1. Relación de equipos y claves en el simulador Aspen Plus®

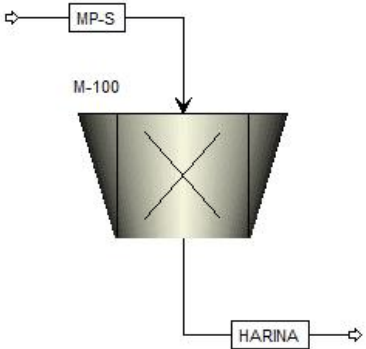
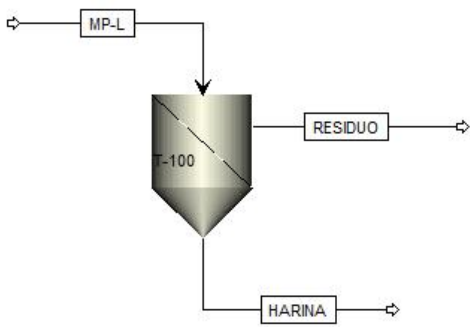
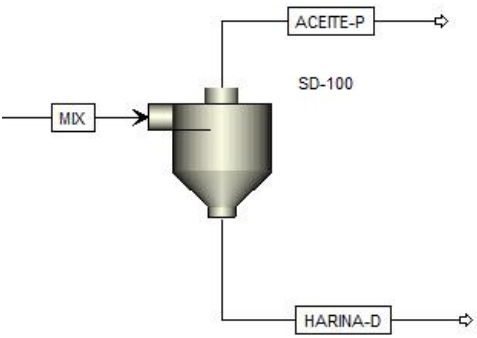
| Equipos | Clave | Equipos encontrados en la paquetería de Aspen Plus | Corrientes |
|--------------|--------|--|--|
| | | | MP-S->Materia Prima Seca |
| Molino | M-100 |  | MP-L->Materia Prima Limpia HARINA->Harina |
| Tamiz | T-100 |  | HARINA->Harina RESIDUO->Residuo HARINA-T->Harina tamizada |
| Sedimentador | SD-100 |  | MIX-> Mezcla de aceite de soya y harina tamizada ACEITE-P->Aceite pigmentado HARINA-D->Harina Despigmada |

Tabla 4.1. Relación de equipos y claves en el simulador Aspen Plus®

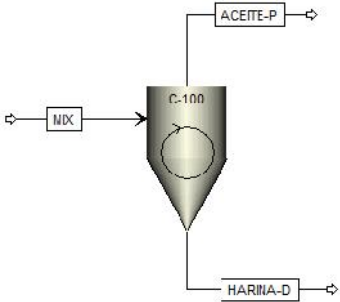
| Equipos | Clave | Equipos encontrados en la paquetería de Aspen Plus | Corrientes |
|------------|-------|---|---|
| Centrífuga | C-100 |  | <p>MIX-> Mezcla de aceite de soya y harina tamizada</p> <p>ACEITE-P-> Aceite Pigmentado</p> <p>HARINA-D-> Harina Despigmentada</p> |

Tabla 4.2. Composición y flujo de las corrientes en el lavador

| | | AGUA-L | | MP | | AGUA-S | | MP-L | |
|-------|----------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | | Flujo (kg/h) | Composición | Flujo (kg/h) | Composición | Flujo (kg/h) | Composición | Flujo (kg/h) | Composición |
| L-100 | Humedad | 350.00 | 100.00 | 542.71 | 77.53 | 350.00 | 100.00 | 542.71 | 77.53 |
| | Proteína | 0.00 | 0.00 | 76.09 | 10.87 | 0.00 | 0.00 | 76.09 | 10.87 |
| | Lípidos | 0.00 | 0.00 | 8.68 | 1.24 | 0.00 | 0.00 | 8.68 | 1.24 |
| | Quitina | 0.00 | 0.00 | 24.78 | 3.54 | 0.00 | 0.00 | 24.78 | 3.54 |
| | Ceniza | 0.00 | 0.00 | 39.9 | 5.70 | 0.00 | 0.00 | 39.9 | 5.70 |
| | Fibra | 0.00 | 0.00 | 7.84 | 1.12 | 0.00 | 0.00 | 7.84 | 1.12 |
| | Total | 350 | 100 | 700 | 100 | 350 | 100 | 700 | 100.00 |

Tabla 4.3. Composición y flujo de las corrientes en el secador

| | | AIRE-C | | MP-L | | AIRE-F | | MP-S | |
|-------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | | Flujo (kg/h) | Composición | Flujo (kg/h) | Composición | Flujo (kg/h) | Composición | Flujo (kg/h) | Composición |
| S-100 | Humedad | 20.00 | 0.20 | 542.71 | 77.53 | 560.16 | 5.31 | 2.55 | 1.60 |
| | Proteína | 0.00 | 0.00 | 76.09 | 10.87 | 0 | 0.00 | 76.09 | 47.60 |
| | Lípidos | 0.00 | 0.00 | 8.68 | 1.24 | 0 | 0.00 | 8.68 | 5.43 |
| | Quitina | 0.00 | 0.00 | 24.78 | 3.54 | 0 | 0.00 | 24.78 | 15.50 |
| | Ceniza | 0.00 | 0.00 | 39.9 | 5.70 | 0 | 0.00 | 39.9 | 24.96 |
| | Fibra | 0.00 | 0.00 | 7.84 | 1.12 | 0 | 0.00 | 7.84 | 4.90 |
| | Aire | 9980.00 | 99.80 | 0 | 0.00 | 9980 | 94.69 | 0.00 | 0.00 |
| | Flujo total | 10000 | 100 | 700 | 100 | 10540.16 | 100 | 159.84 | 100 |

Tabla 4.4. Composición y flujo en el molino

| | | MP-L | | HARINA | |
|-------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | | Flujo (kg/h) | Composición | Flujo (kg/h) | Composición |
| M-100 | Humedad | 2.55 | 1.60 | 2.55 | 1.60 |
| | Proteína | 76.09 | 47.60 | 76.09 | 47.60 |
| | Lípidos | 8.68 | 5.43 | 8.68 | 5.43 |
| | Quitina | 24.78 | 15.50 | 24.78 | 15.50 |
| | Ceniza | 39.9 | 24.96 | 39.9 | 24.96 |
| | Fibra | 7.84 | 4.90 | 7.84 | 4.90 |
| | Aire | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Flujo total | 159.84 | 100 | 159.84 | 100 |

Tabla 4.5. Composición y flujo en el tamiz

| | | MP-L | | HARINA | |
|-------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | | Flujo (kg/h) | Composición | Flujo (kg/h) | Composición |
| T-100 | Humedad | 2.55 | 1.60 | 2.55 | 1.60 |
| | Proteína | 76.09 | 47.60 | 76.09 | 47.60 |
| | Lípidos | 8.68 | 5.43 | 8.68 | 5.43 |
| | Quitina | 24.78 | 15.50 | 24.78 | 15.50 |
| | Ceniza | 39.9 | 24.96 | 39.9 | 24.96 |
| | Fibra | 7.84 | 4.90 | 7.84 | 4.90 |
| | Aire | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 |
| | Flujo total | 159.84 | 100 | 159.84 | 100 |

Tabla 4.6. Composiciones y flujos en el sedimentador

| | | MIX | | HARINA-D | | ACITE-P | |
|-------|----------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | | Flujo (kg/h) | Composición | Flujo (kg/h) | Composición | Flujo (kg/h) | Composición |
| D-100 | Humedad | 2.55 | 0.14503138 | 2.55 | 1.629392971 | 0 | 0 |
| | Proteína | 76.09 | 4.32762249 | 76.09 | 48.61980831 | 0 | 0 |
| | Lípidos | 8.68 | 0.49367543 | 5.34 | 3.412140575 | 3.34 | 0.20895893 |
| | Quitina | 24.78 | 1.40936372 | 24.78 | 15.83386581 | 0 | 0 |
| | Ceniza | 39.9 | 2.26931446 | 39.9 | 25.49520767 | 0 | 0 |
| | Fibra | 7.84 | 0.44590039 | 7.84 | 5.009584665 | 0 | 0 |
| | Astaxantina | 0.000238 | 1.3536E-05 | 0 | 0 | 0.000238 | 1.489E-05 |
| | Aceite de soya | 1598.4 | 90.9090786 | 0 | 0 | 1598.4 | 99.9999851 |
| | Flujo total | 1758.24024 | 100 | 156.5 | 100 | 1598.40024 | 1598.40024 |

Tabla 4.7. Composiciones y flujos en la centrífuga

| | | MIX | | HARINA-D | | ACITE-P | |
|-------|----------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | | Flujo (kg/h) | Composición | Flujo (kg/h) | Composición | Flujo (kg/h) | Composición |
| C-100 | Humedad | 2.55 | 0.14503138 | 2.55 | 1.629392971 | 0 | 0 |
| | Proteína | 76.09 | 4.32762249 | 76.09 | 48.61980831 | 0 | 0 |
| | Lípidos | 8.68 | 0.49367543 | 5.34 | 3.412140575 | 3.34 | 0.209 |
| | Quitina | 24.78 | 1.40936372 | 24.78 | 15.83386581 | 0 | 0 |
| | Ceniza | 39.9 | 2.26931446 | 39.9 | 25.49520767 | 0 | 0 |
| | Fibra | 7.84 | 0.44590039 | 7.84 | 5.009584665 | 0 | 0 |
| | Astaxantina | 0.10339 | 1.3536E-05 | 0 | 0 | 0.10339 | 0.006 |
| | Aceite de soya | 1598.4 | 90.9090786 | 0 | 0 | 1598.4 | 99.785 |
| | Flujo total | 1758.34339 | 100 | 156.5 | 100 | 1601.84339 | 100 |

En la Tabla 4.2 se observa el comportamiento de las corrientes entrantes al lavador donde se lleva a cabo la operación de semilavado necesaria para retirar toda la suciedad que pudiera tener la materia prima debido a la manipulación. La composición de las corrientes en esta operación no se ve afectada debido a la programación donde se especifica que todo se lleva a cabo sobre una rejilla con una aspersion de agua a una presión de 300 kPa lo cual evita que la materia prima absorba agua retirando únicamente la suciedad superficial que pudieran tener.

El secado es una operación donde existe un cambio en la composición de las corrientes de entrada. La materia prima limpia ingresa con una humedad de 77.53% y, finalmente, sale en forma de materia prima seca con humedad de 1.60% lo cual es debido a la transferencia de la humedad desde los residuos hacia la corriente de aire tibio y seco. La finalidad de eliminar la gran cantidad de agua que contiene la materia prima es que ésta impide la correcta extracción de los pigmentos carotenoides por su carácter mayormente lipofílico. Silva et al. (2018) realizaron la extracción de astaxantina con un secador de lecho fluidificado, donde a 90°C obtuvieron una humedad de 8.70% que es mayor a la que fue calculada por el software. Por otro lado, Luna-Rodríguez (2003), al tratar los subproductos (mal llamados residuos) de camarón, en la operación de secado a 65°C durante 24 horas obtuvo una pérdida en masa del 78.40% que, comparado con el 77.17% de pérdida obtenida por el software, es relativamente similar.

Las operaciones de molienda y tamizado permiten fragmentar la materia en partículas tan pequeñas que las moléculas son más fácilmente extraíbles con ayuda del disolvente por la disminución del coeficiente de transferencia (López-Corres y Frías-Mendoza, 1976). En el caso de la simulación de ambas operaciones, la composición de las corrientes de entrada no se ve afectada sino que únicamente se disminuye el tamaño de partícula hasta 117 μm . Chougle et al. (2016) determinaron que un tamaño de partícula de 100 μm permite aumentar la extracción en casi un 13% en comparación con un tamaño de partícula de 300 μm , por lo que podría cambiarse y simularse otros tamaños de partícula para observar el efecto de ello en la extracción final.

La Tabla 4.6 muestra los resultados de las corrientes de entrada y salida de la operación más importante para la recuperación de la astaxantina de los residuos de camarón, la extracción en un sedimentador. La corriente de entrada contiene la salida del tamiz con aceite de soya en proporción 1:10 (aceite:subproductos) mezclados. A la salida el aceite de soya logra extraer teóricamente toda la astaxantina contenida en los subproductos formando el aceite pigmentado, obteniéndose 103.39 g de pigmento de 700 kg de subproductos ingresados lo que representa un rendimiento de 147700 μg de astaxantina/kg de residuo, lo cual es más de 100 veces mayor a lo obtenido por Romero-Olmos (2019) utilizando exactamente la misma metodología. Se debe destacar que esto es completamente ideal y que lo pertinente sería repetir la metodología en una escala media. De esta manera se podría visibilizar mejor cuál es un rendimiento real. La razón por la cual en este caso se logra extraer por completo la astaxantina de los residuos se debe a que el software no contiene todos los datos necesarios para determinar los coeficientes de extracción por lo que se supone como primera aproximación que la extracción es completa.

La operación de centrifugación (Tabla 4.7) no causa un cambio en la composición de las corrientes, únicamente nos permite realizar una separación física entre el aceite pigmentado y la harina despigmentada. El principio de esta separación se basa en la fuerza centrífuga que permite empujar los sólidos al fondo mientras que los líquidos se irían a la parte superior por la diferencia de densidades.

La metodología implementada demuestra ser muy útil para la extracción de astaxantina. Cada etapa cumple una función precisa y ninguna de ellas genera algún cambio drástico en la materia prima para, posteriormente, poder obtener otros subproductos como son los minerales y la quitina, que pueden aumentar el aprovechamiento íntegro de los residuos de camarón logrando obtener más ganancias. A pesar de las ventajas, cabe destacar que a partir de lo realizado es imposible obtener la astaxantina en su estado puro sino un aceite pigmentado que brinda valor agregado por la clase de ácidos grasos que contiene el aceite de soya y por la protección antioxidante que le da logrando que se mantengan todas las propiedades del compuesto.

Dada la naturaleza de esta investigación (teórica debido a la “sana distancia” exigida para minimizar los riesgos del Covid-19), no es posible comparar directamente los resultados con metodologías experimentales. Sin embargo, se puede comparar dividiendo el proceso por operaciones unitarias, ya que de esta manera es más sencillo el ubicar las diferencias y observar las áreas de oportunidad en cada una de ellas. Por otra parte, al ser utilizado un software de simulación que dará resultados ideales superiores a los reales, como aproximación es sumamente útil pero siempre será ampliamente recomendado llevarlo a experimentación real a nivel de laboratorio, luego piloto y, finalmente, a escala prototipo.

Es posible realizar variaciones a esta metodología, cambiando el tipo de extracción, el solvente utilizado, los pretratamientos aplicados, entre otras. A diferencia de otro tipo de trabajos de experimentación, en este caso el cambiar las condiciones es mucho más sencillo a través del uso de un software, buscando la manera de optimizar el proceso.

A partir de las corrientes de salida puede verse que no se genera una gran cantidad de residuos, solamente agua del lavador que puede ser reutilizada de anexarse una pequeña planta de tratamiento de agua y harina despigmentada que puede utilizarse como materia prima para la obtención de otros subproductos (Ortega-Granados y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2014).

En cuanto a la energía requerida aún es necesario hacer un análisis más exhaustivo de balances energía para conocer por completo los requerimientos. Sin embargo, por ahora se puede decir

que el equipo que necesita una mayor cantidad de energía es el secador ya que para disminuir la cantidad de humedad contenida en los residuos es necesaria.

Dadas las razones antes expuestas, se puede señalar que la metodología evaluada y analizada en este trabajo es congruente con los principios de la química verde (Török y Dransfield, 2018). Lo más destacable es que se previene la generación de residuos, se usa un solvente amigable con el ambiente, se requieren bajas cantidades de energía que podrían llegar a optimizarse, se propone la reutilización de los materiales empleados y se basa en la recuperación y utilización de residuos producidos por otra industria, aquí llamados subproductos.

4.1.2. Análisis de costos

La Tabla 4.8 presenta los resultados del análisis económico por equipo obtenido mediante el software Aspen Plus®.

Tabla 4.8. Resultado del análisis económico por equipo obtenido en Aspen Plus®

| Equipo | Costo (USD) |
|--------------|-------------|
| Lavador | \$1,780,330 |
| Secador | \$1,455,860 |
| Molino | \$1,386,380 |
| Tamiz | \$1,257,540 |
| Sedimentador | \$1,386,380 |
| Centrífuga | \$1,386,380 |
| Total | \$8,652,870 |

A partir del análisis económico arrojado por el software de simulación se obtiene el costo capital de cada uno de los equipos requeridos para llevar a cabo esta metodología. El equipo más costoso es el lavador, probablemente debido a las instalaciones de agua requeridas para su operación. Por otra parte, el más económico es el tamiz, cuya función es uniformar el tamaño de partícula por lo que no requiere de muchas más cosas extra.

El costo total de los equipos asciende a casi 9 millones de dólares estadounidenses lo que representa una gran inversión para tener la planta de tratamiento de subproductos de camarón

para la obtención de astaxantina. En comparación con Benavente et al. (2009) quienes calcularon que la inversión necesaria para la colocación de una Planta Piloto de tratamiento de subproductos de camarón era de \$10,520.94 (dólares estadounidenses) es ligeramente menor. Esto es interesante, ya esa planta se diseñó pensando en el tratamiento de 50 kg, que es 14 veces menos a lo planteado en esta investigación.

Dado que en este caso lo obtenido es un aceite de soya pigmentado con astaxantina, no se puede dar un valor estimado de cuánto se obtendría al comercializarlo. Aunque no es posible dar una cantidad precisa, el hecho de usar este solvente ayuda a que sea más sencillo integrarlo a otros alimentos o encapsularlo para obtener todos los beneficios de este nutracéutico.

De haberse obtenido astaxantina pura de una fuente natural, el valor de lo obtenido en un año ascendería a \$11,793,676.62 dólares americanos, con base en el precio por miligramo reportado en la página de Sigma Aldrich, lo que demostraría que el retorno de inversión se daría en poco menos de un año.

De igual manera, se puede extraer de la harina despigmentada la quitina, ya que este compuesto es igualmente valioso en diversas industrias, logrando aumentar las ganancias generadas por el reaprovechamiento de los subproductos de camarón de manera integral (Borja-Urzola et al., 2021, 2020a,b; Ortega-Granados y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2014).

El proyecto es rentable y podría llegar a brindar amplios beneficios a largo plazo para los pescadores y/o granjeros de camarón y para las industrias procesadoras, ya que podría proponerse la creación de una cooperativa donde se puedan repartir las ganancias entre todos los participantes, especialmente las cooperativas pesqueras de camarón que durante la época de veda tienen condiciones precarias, tanto para ellos como para sus familias. De hecho, hace ya más de 20 años se propuso la instalación de un molino-secador en la cubierta de las embarcaciones camaroneras para que con los gases de combustión de los motores de las embarcaciones se calentara aire para el secador y que, en vez de tirar los subproductos del camarón al mar al preparar las “marquetas” los molieran y secaran obteniendo “harinas” listas para la extracción de quitina y carotenoproteínas en tierra y que también molieran y secaran en

el mismo equipo la fauna de acompañamiento para llegar a tierra con “harina de pescado” lista para preparar surimis y otros alimentos (Calderón-Villagómez et al., 1992; Durán-Domínguez-de-Bazúa et al., 2021; González-Piña y Pérez-Mendoza, 1991a,b). Este mismo equipo de molienda y secado simultáneamente podría usarse en las granjas camaronícolas para reaprovechar los subproductos de sus granjas y, no solamente para el camarón, sino también por los pescadores de jaibas y otros crustáceos (langostas, langostinos, acociles, etc.), ya que también poseen carotenoproteínas y quitina (Casariego et al., 2009; Mendoza-Pérez et al., 2014).

A continuación, en el último capítulo se presentan las conclusiones derivadas de esta investigación y las recomendaciones para continuarla.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

De acuerdo con los objetivos propuestos en esta investigación, a continuación se presentan las conclusiones:

-) El mejor método de extracción de los pigmentos carotenoides seleccionado para separaralos del material granular de cefalotórax y exoesqueletos de camarón (harina) fue utilizando aceite de soya a 80°C en una proporción 1:10 (harina:aceite)
-) El procedimiento se consideró verde ya que no se emplearon sustancias contaminantes para el ambiente, además de aprovechar estos subproductos de granjas y captura
-) Se comprobó la posibilidad y viabilidad económica sobre el reaprovechamiento de los subproductos de camarón, cefalotórax y exoesqueletos, para la obtención de productos con un alto valor agregado
-) El capital necesario para la instalación de los equipos se estimó mediante el software Aspen Plus ® en \$8,652,870 USD (dólares estadounidenses). Sin embargo, su implementación sería muy recomendable, ya que las ganancias estarían en un aproximado de \$11,793,676.62 USD/año considerando el precio de venta de los pigmentos con base en la astaxantina y debe también tomarse en cuenta el valor agregado que brinda el aceite de soya
-) Es posible analizar la viabilidad de la extracción de quitina para otros fines aumentando las ganancias generadas por el reaprovechamiento de ambos subproductos del camarón.

5.2. Recomendaciones

El análisis de costos que brindan los programas de Aspen Tech ® permiten determinar principalmente, el capital de inversión necesario para la instalación. Sería recomendable

realizar un estudio más amplio donde se tomaran en consideración los costos de mano de obra, construcción, inflación e intereses generados, entre otros conceptos, para contar con un enfoque más certero en cuanto a la viabilidad económica del proyecto.

Ya confirmada esta viabilidad teórica será importante realizar pruebas a escala de banco, después a escala de planta piloto y, por último, a nivel prototipo para ya definir la propuesta llave en mano de una planta para los sinaloenses en México y otras comunidades interesadas.

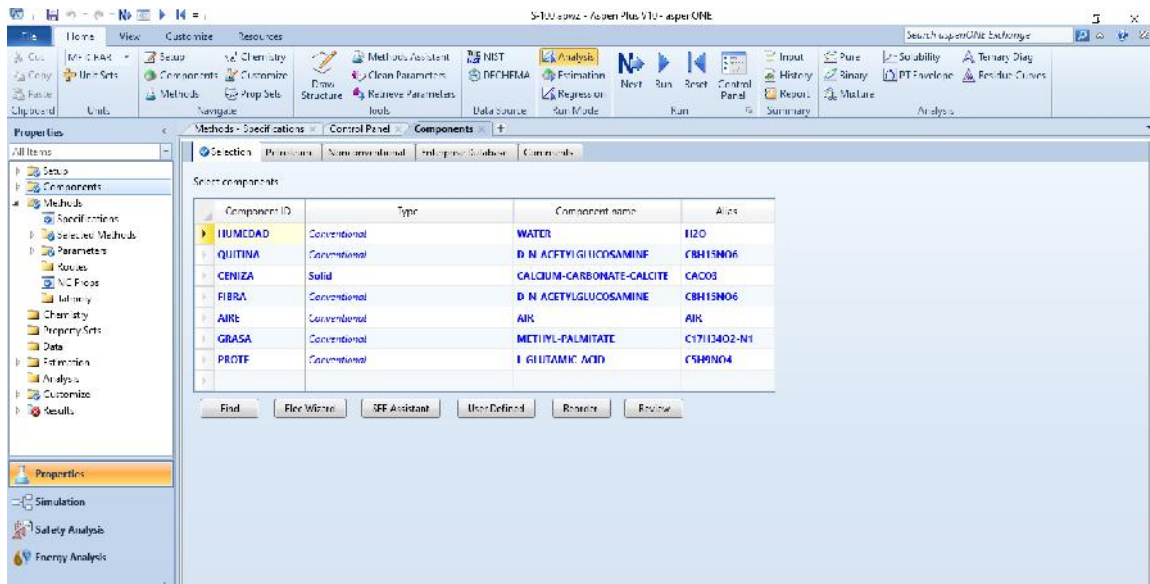
A N E X O S

ANEXO 1

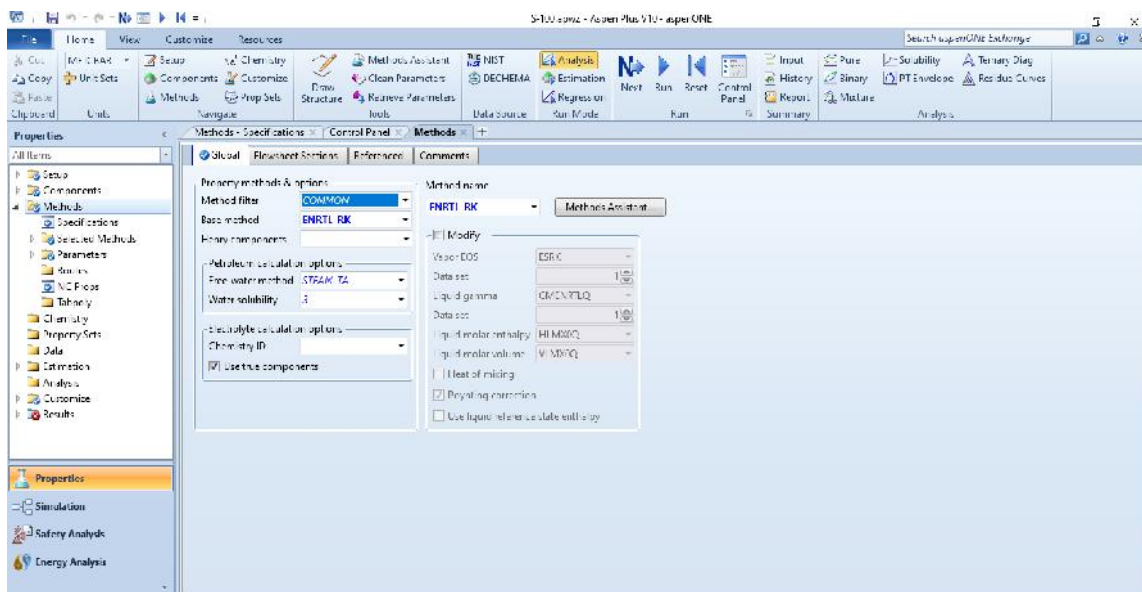
Metodologías detalladas para la simulación en Aspen Plus®

A.1.1. Semilavado

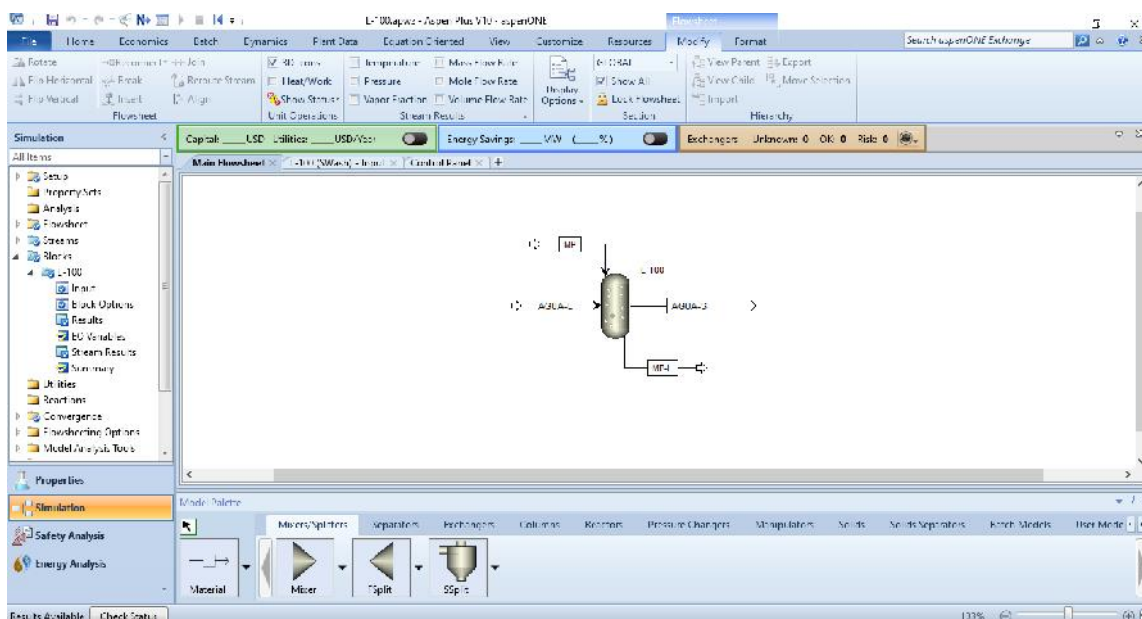
Para la simulación de esta operación primero se deben indicar los componentes de los residuos de camarón. La composición inicial ingresada fue la determinada por Tlelo-Bárcena (2021), la cual consiste en humedad, grasa, proteína, cenizas, quitina y fibra cruda.



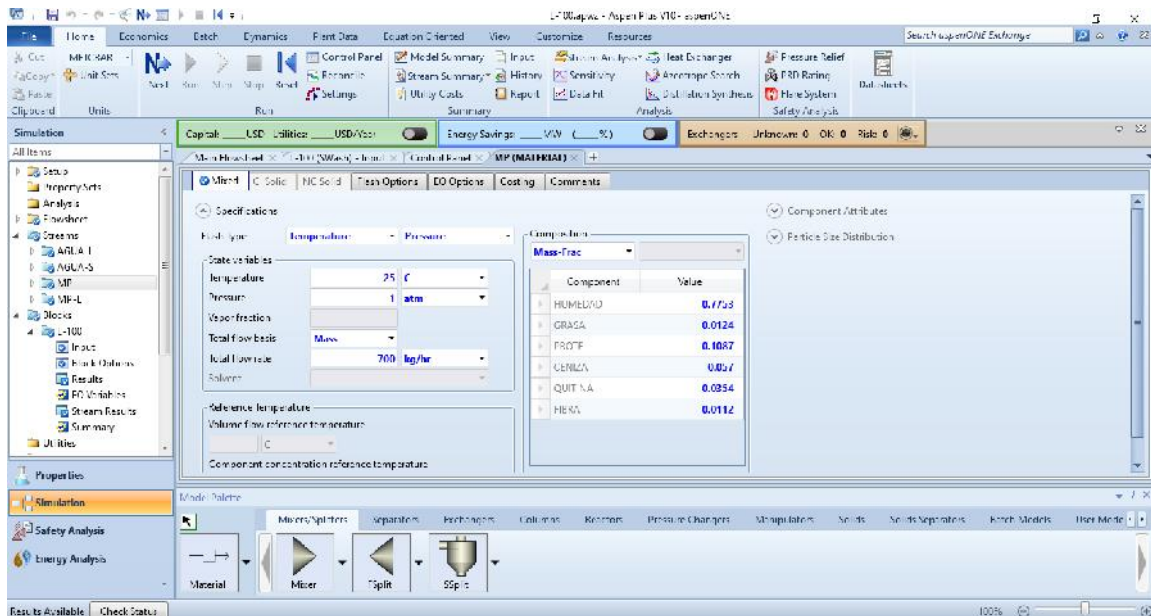
Posteriormente, se eligió el paquete termodinámico ENRTL-RK ya que este brinda los datos necesarios para poder realizar los cálculos correspondientes obteniendo los balances de energía.



A continuación, en la sección de simulación se elige el equipo S-WASH en la sección de sólidos para poder llevar a cabo esta operación. Se colocan las corrientes de materia, dos correspondientes al agua y dos a la materia prima.



Después, se añaden las características de las corrientes (presión, temperatura, flujo y composición) de entrada, en este caso AGUA-L correspondiente al agua limpia y MP para materia prima inicial. Las condiciones de dichas corrientes son 350 kg/h, 25°C, 300 kPa y composición de 100% agua para la corriente AGUA-L y 700 kg/h, 25°C, 1 atm y composición de 10.87% proteína, 5.70% ceniza, 3.54% quitina, 1.24% grasa, 77.53% humedad y 1.12% fibra cruda para la corriente MP.

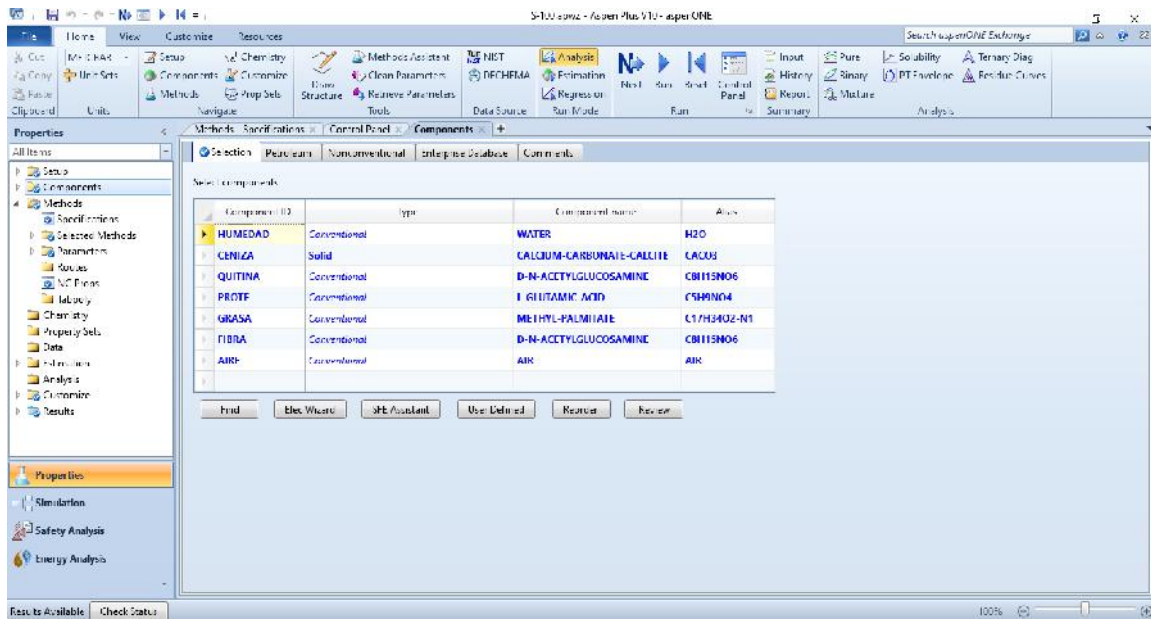


Finalmente se corre la simulación para obtener los resultados del balance de materia y se activa el análisis de costos para conocer el capital requerido para la instalación del equipo.

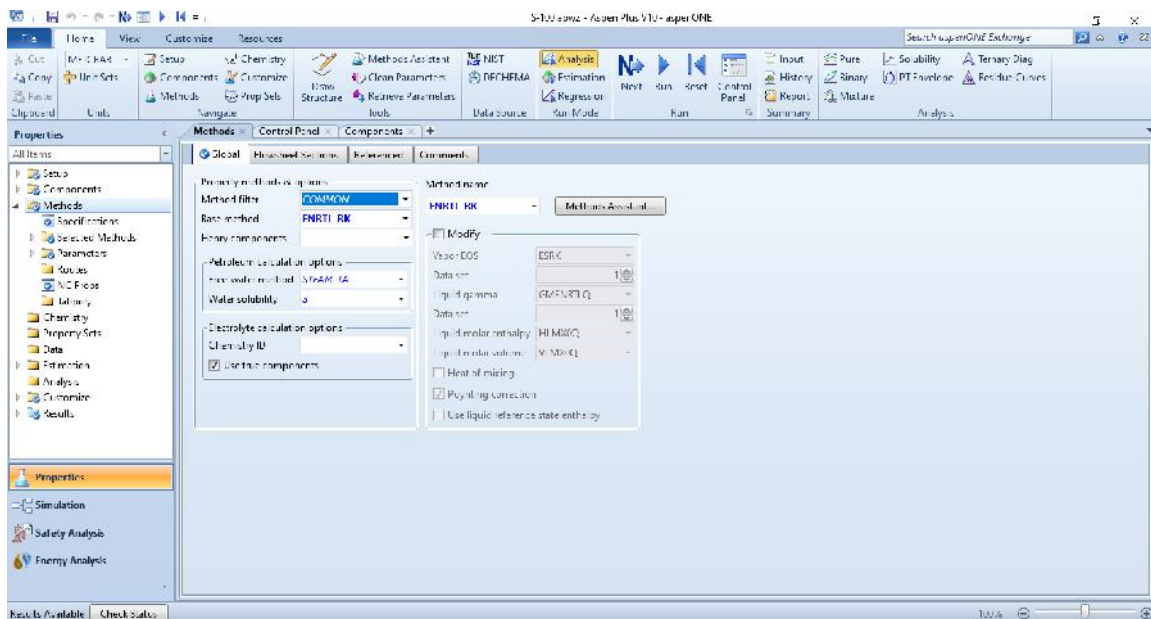


A.1.2. Secado

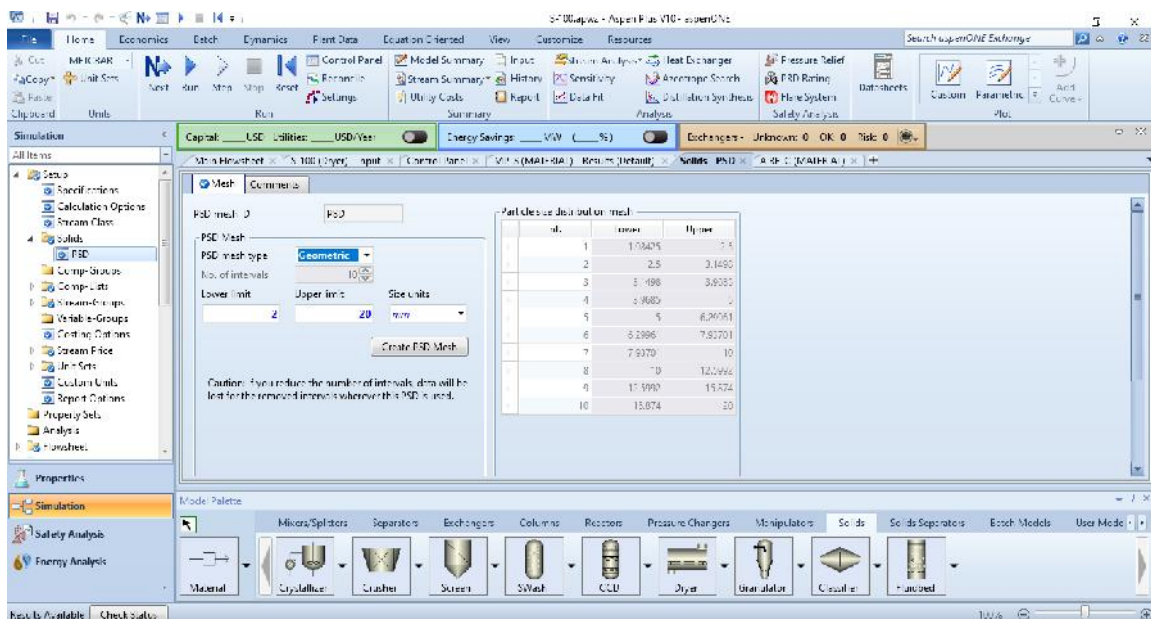
Para la simulación de esta operación primero se deben indicar los componentes de los residuos de camarón. La composición inicial ingresada fue el resultado del semilavado simulado anteriormente, añadiendo también aire como fluido de servicio para que se lleve a cabo el secado. En este caso, se determina que la ceniza es un sólido para que se pueda llevar a cabo la operación.



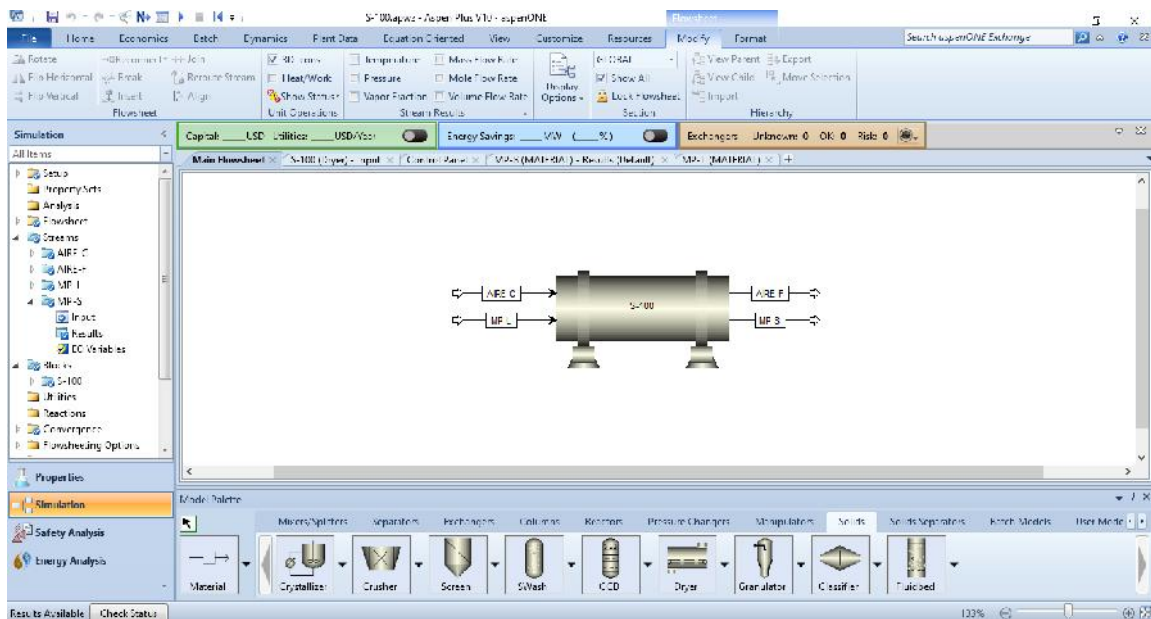
Se eligió nuevamente el paquete termodinámico ENRTL-RK.



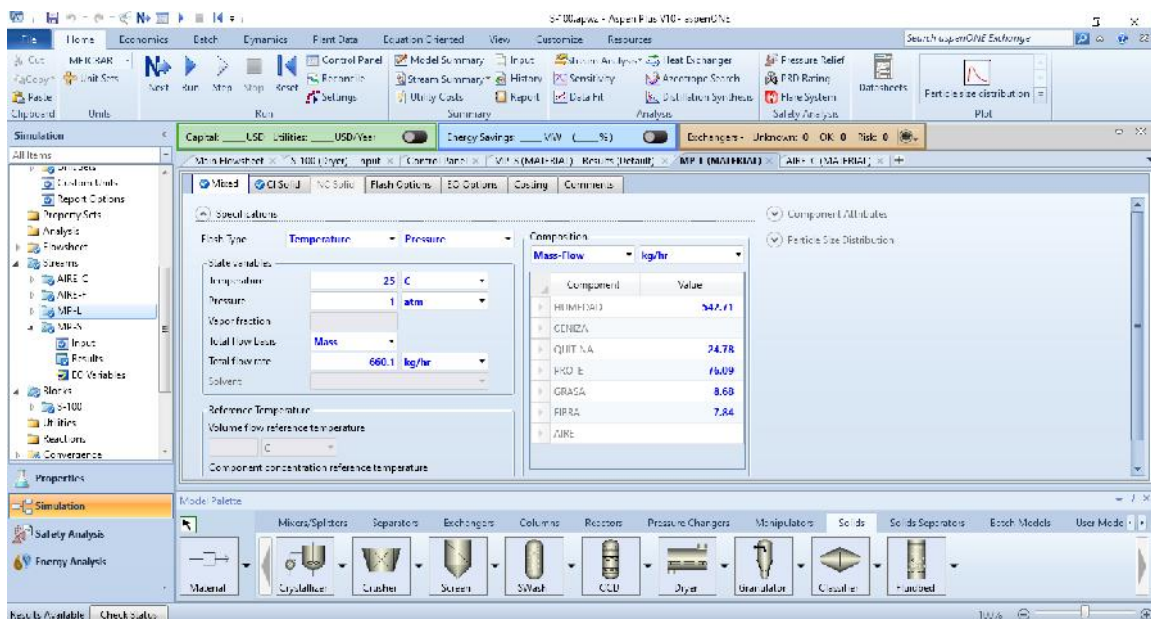
Antes de comenzar la simulación, en el área de Setup Solids, se establece que el componente de la humedad es únicamente el agua. Posteriormente, se crea la distribución del tamaño de partícula determinando el tamaño aproximado de los residuos y su abundancia. En este caso, debido a que estos son los residuos tal cual, el tamaño aproximado se determinó entre 2 y 20 mm.

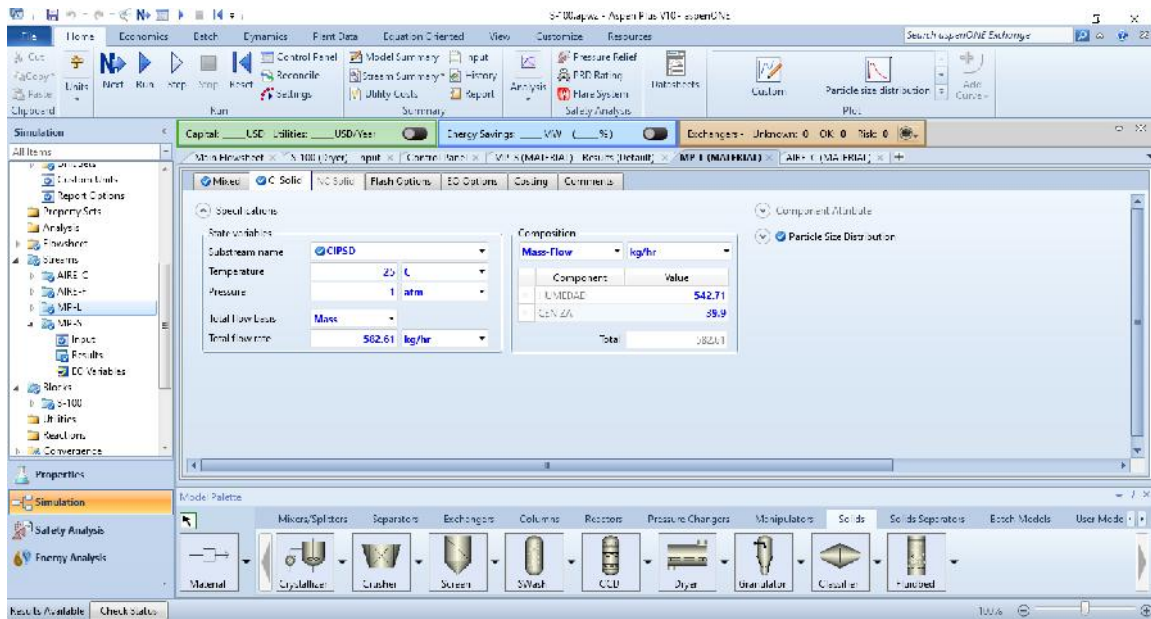


A continuación, en la sección de simulación se elige el equipo DRYER en la sección de sólidos para poder llevar a cabo esta operación. Se colocan las corrientes de materia, dos correspondientes al aire y dos a la materia primera ya lavada.

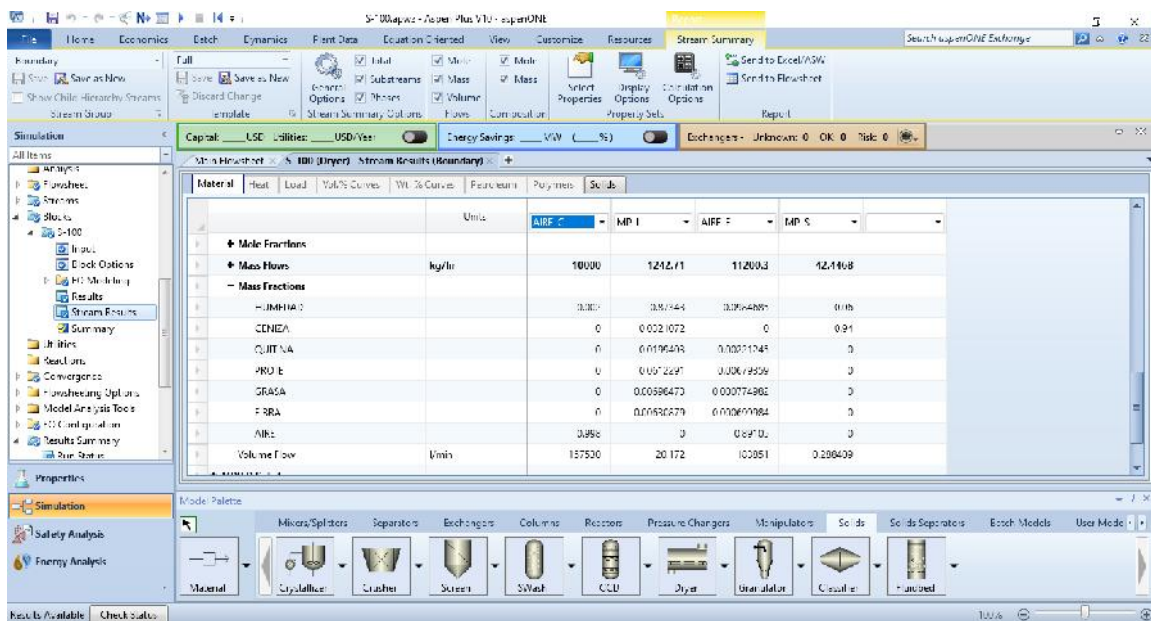


Después, se añaden las características de las corrientes (presión, temperatura, flujo y composición) de entrada, en este caso AIRE-C correspondiente al aire caliente como fluido de servicio para el secado y MP-L para los residuos de camarón limpios. Las condiciones de dichas corrientes son 10000 kg/h, 60°C, 1 atm y composición de 98% aire y 2% agua para la corriente AIRE-C. Para la corriente MP-S el flujo es de 700 kg/h, 25°C, 1 atm, en cuanto a la composición, se hace una división en corriente mezclada donde se tienen todos los componentes excepto los sólidos (ceniza) que se coloca junto con el agua en la corriente CI Solids en la que se especifica la distribución del tamaño de partícula.



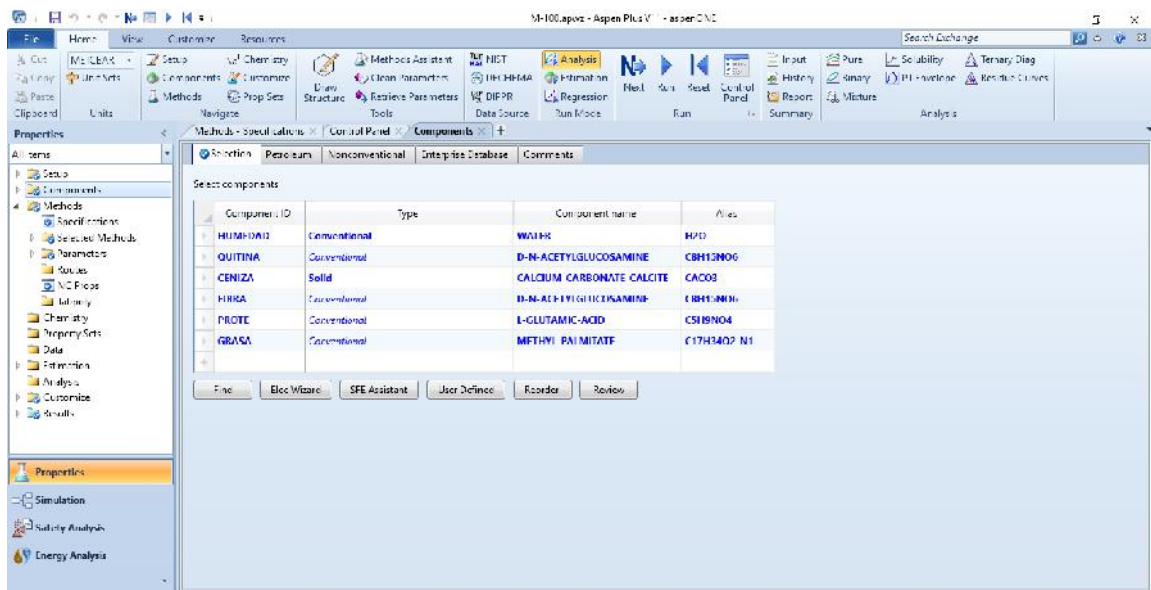


Finalmente se corre la simulación para obtener los resultados del balance de materia y se arranca el análisis de costos para conocer el capital para su instalación.

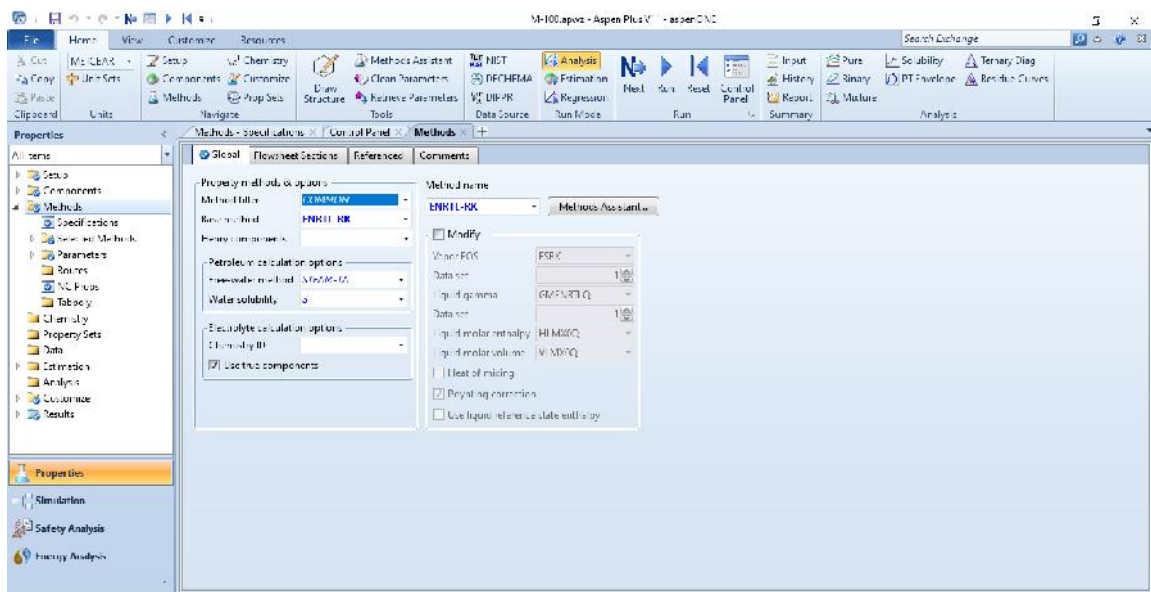


A.1.3. Molienda

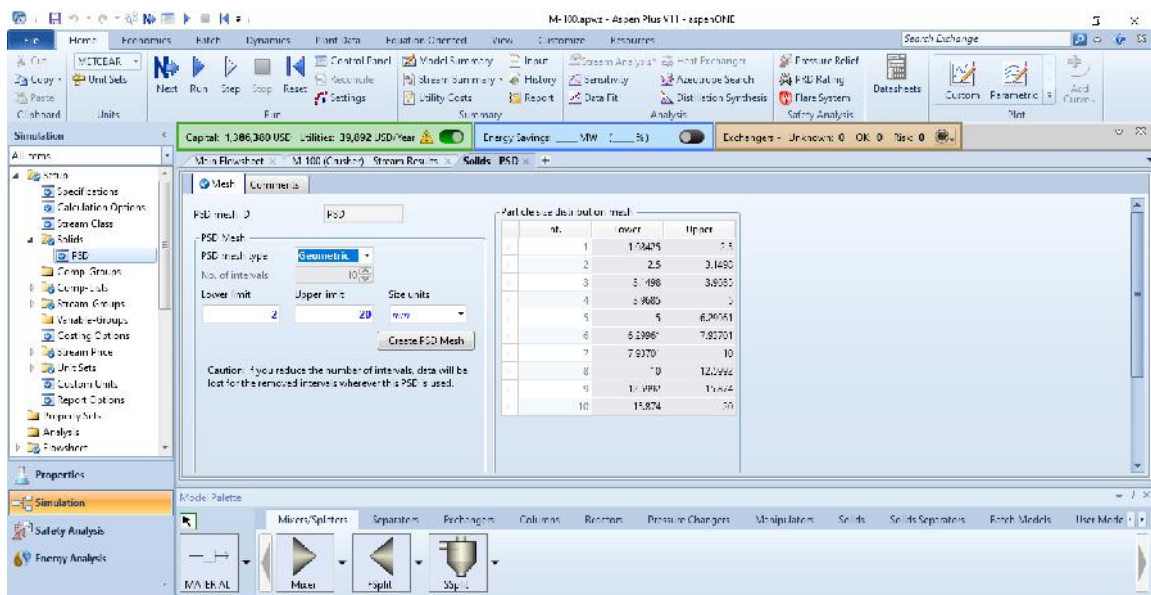
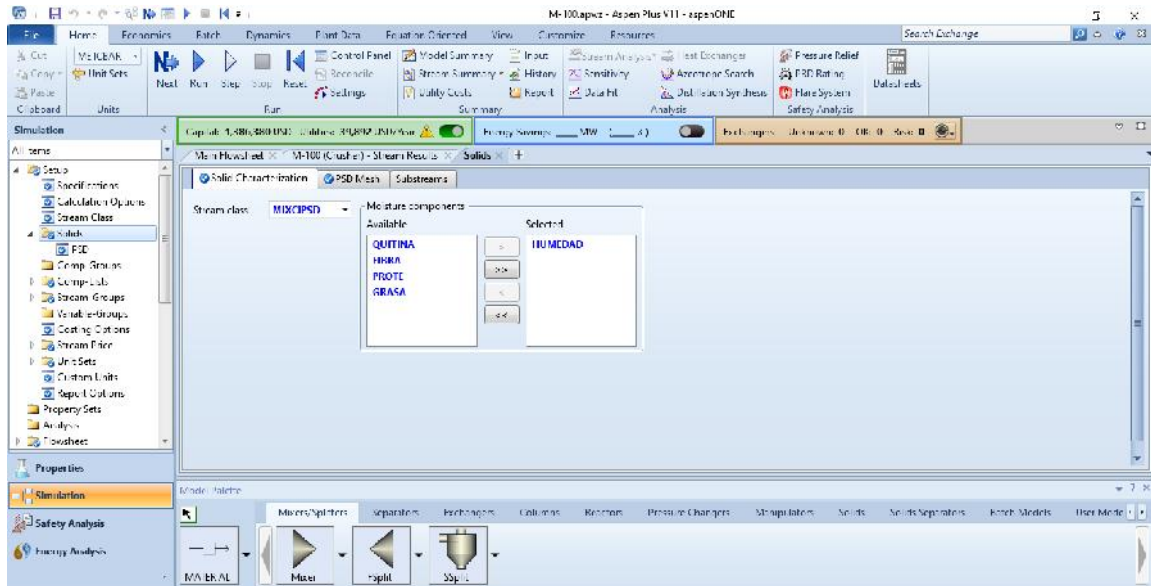
Esta operación requiere primeramente la entrada de los componentes de los cefalotórax y exoesqueletos de camarón y nuevamente se establece que las cenizas (como carbonato de calcio) son un componente sólido, en este caso para poder hacer la disminución del tamaño de partícula.



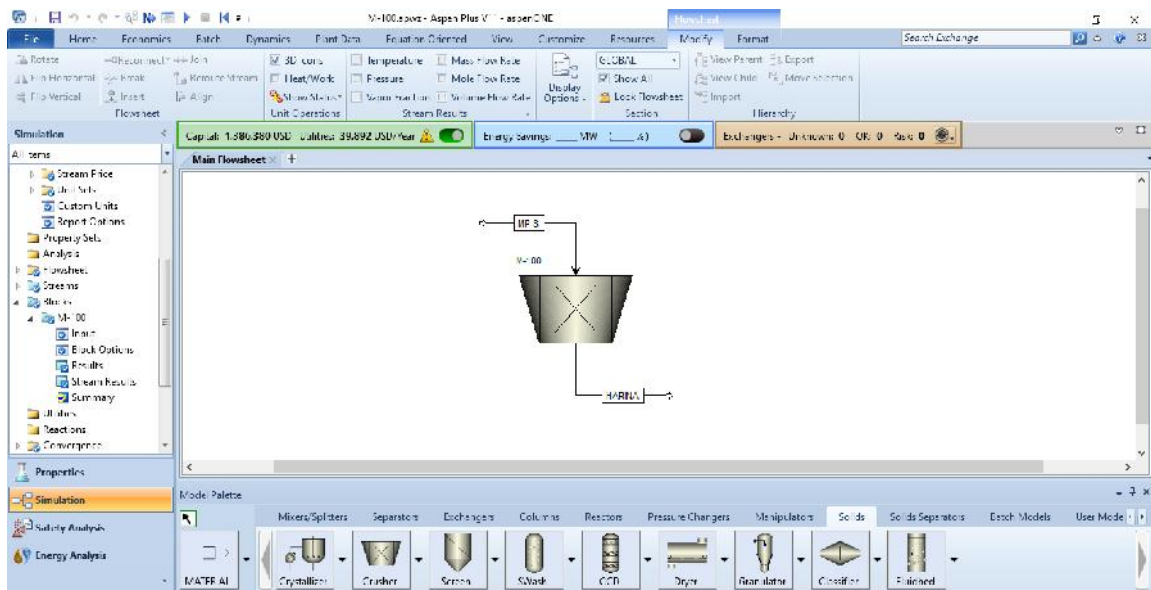
Y, otra vez, se emplea el método termodinámico ENRTL-RK.



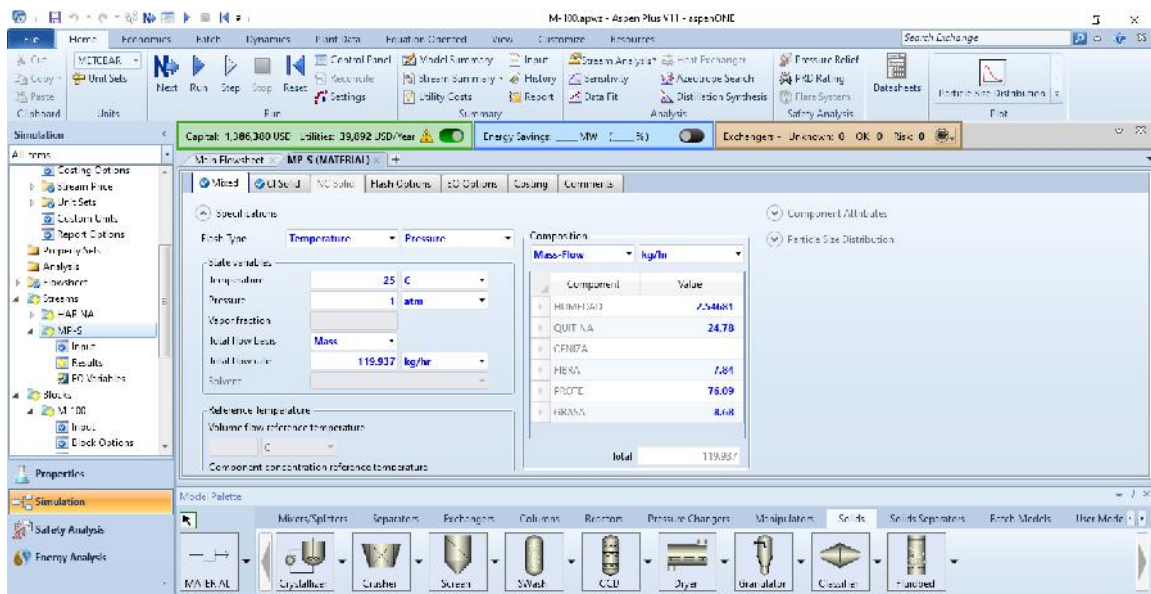
Al igual que en el secado, en el área de Simulación se direcciona a Setup Solids, donde se establece que el agua (humedad) es el componente responsable de la humedad y se establece que se tiene una mezcla con componentes convencionales. Luego, en la subsección de PSD Mesh, se brinda el tamaño de partícula como se hizo en el caso anterior.

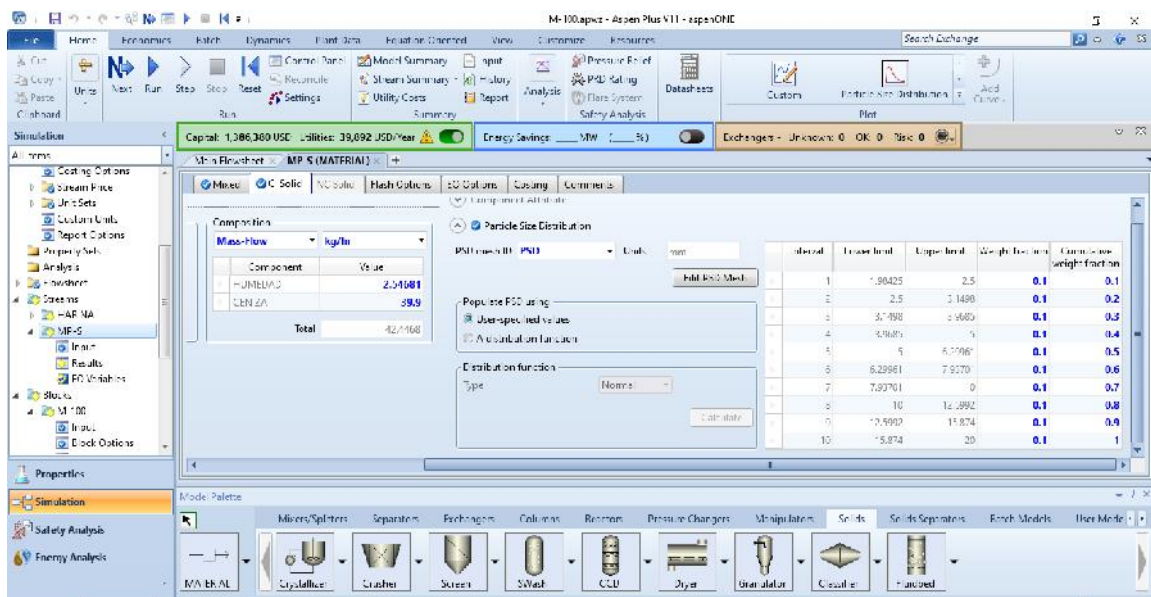
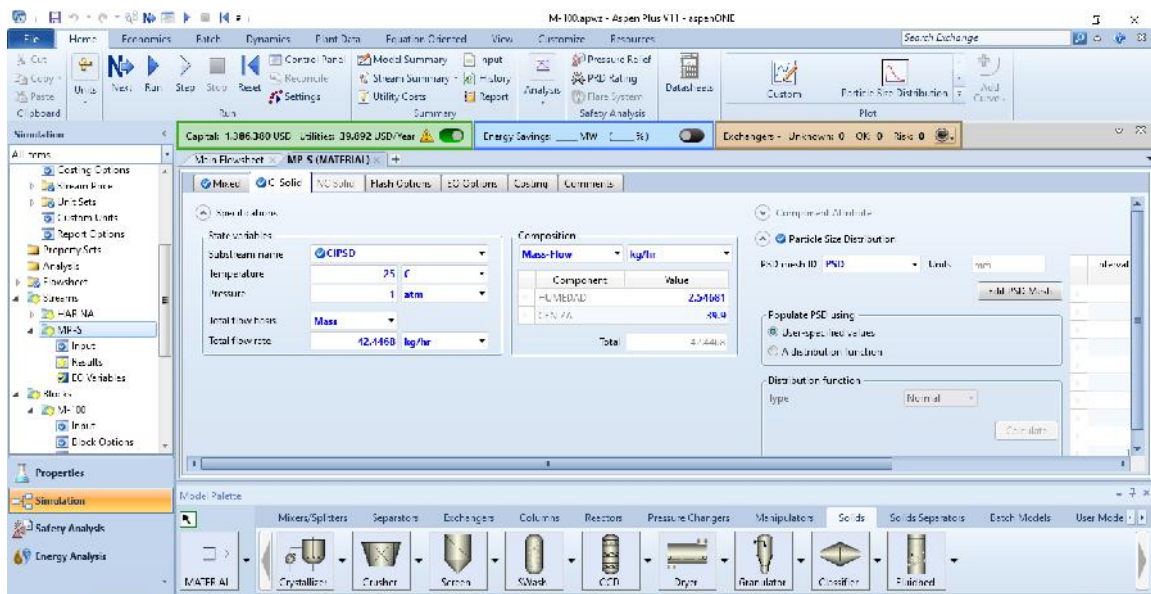


En Main Flowsheet, se añade el equipo CRUSHER de la sección de sólidos, así como las corrientes de entrada y salida. En este caso en entrada ingresa MP-S (Materia Prima Seca) y sale HARINA.

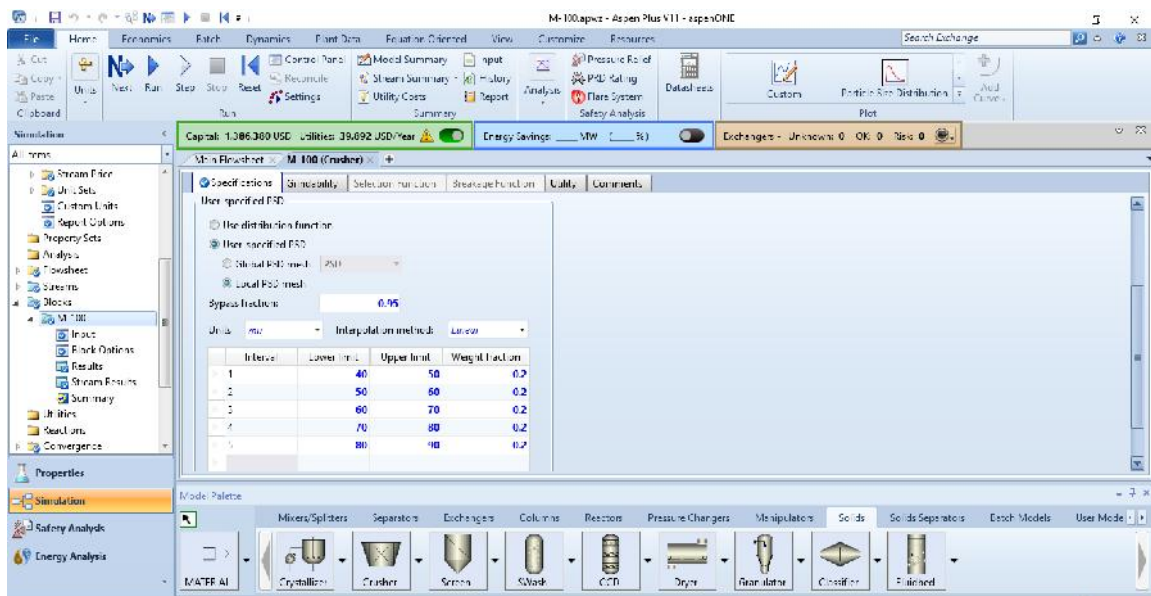
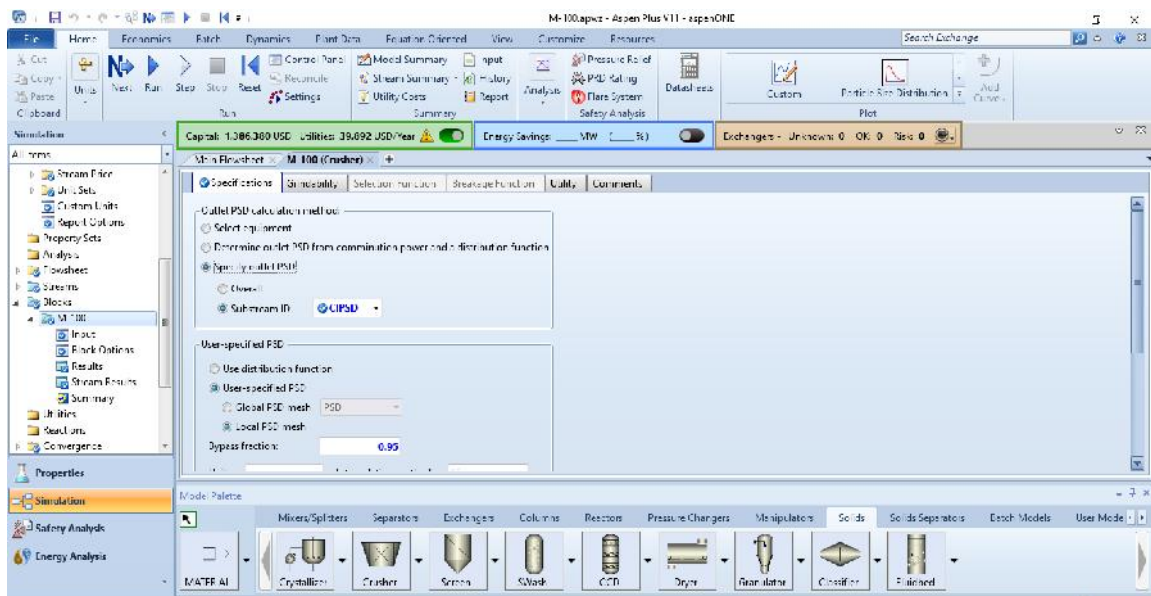


Se determinan las cantidades de cada componente según lo obtenido en la operación unitaria de secado. Se anexan en la sección CI Solid los componentes de ceniza y humedad ya que en esta área permite el establecimiento de los sólidos y la distribución del tamaño de partícula de los mismos.

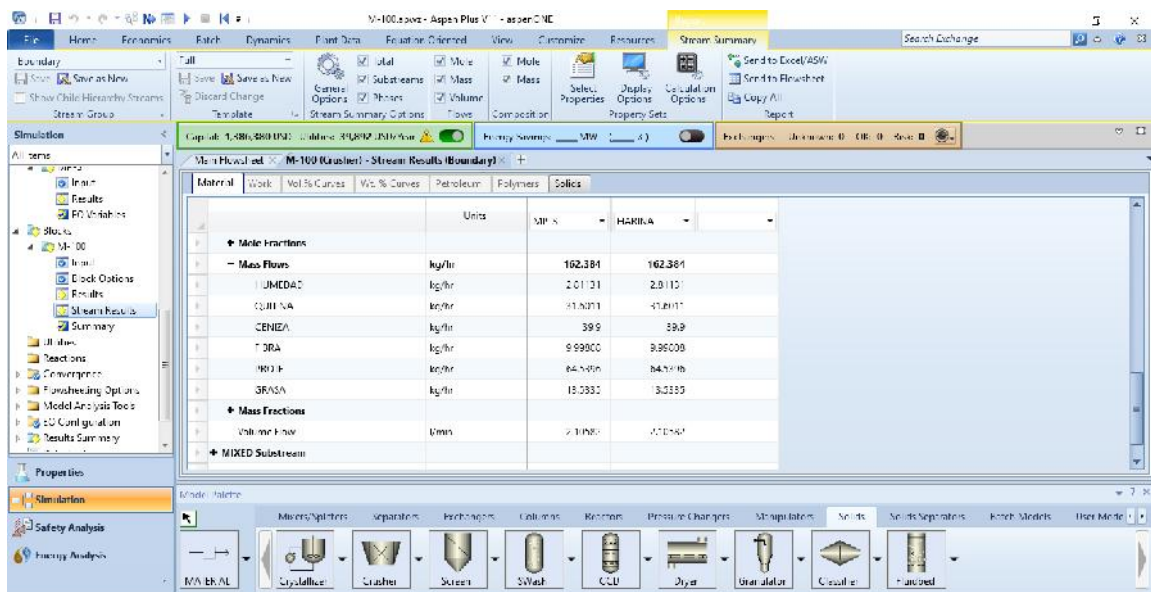




En cuanto al equipo, se da la especificación a la salida sobre la subcorriente creada en el paso anterior, de manera específica y local, estableciendo una nueva distribución de tamaño de partícula y su abundancia correspondiente.

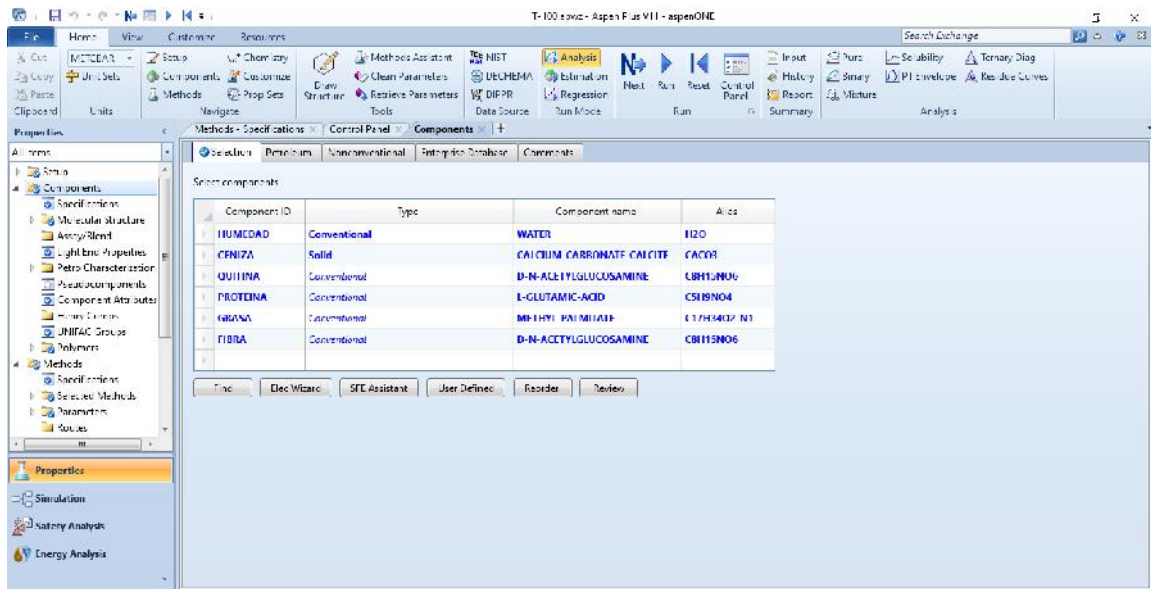


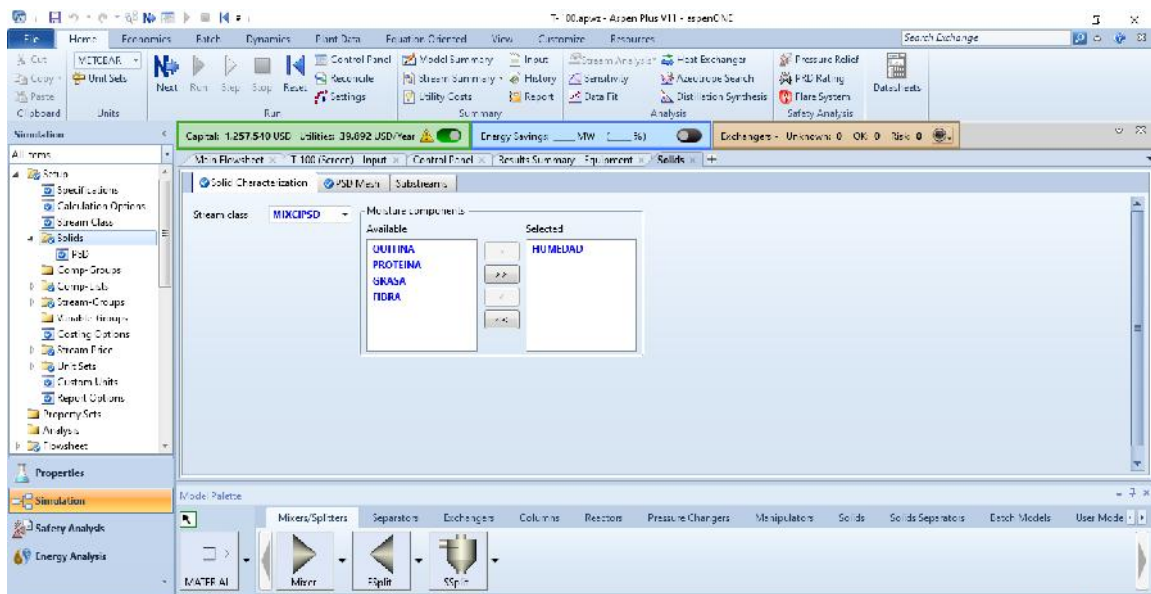
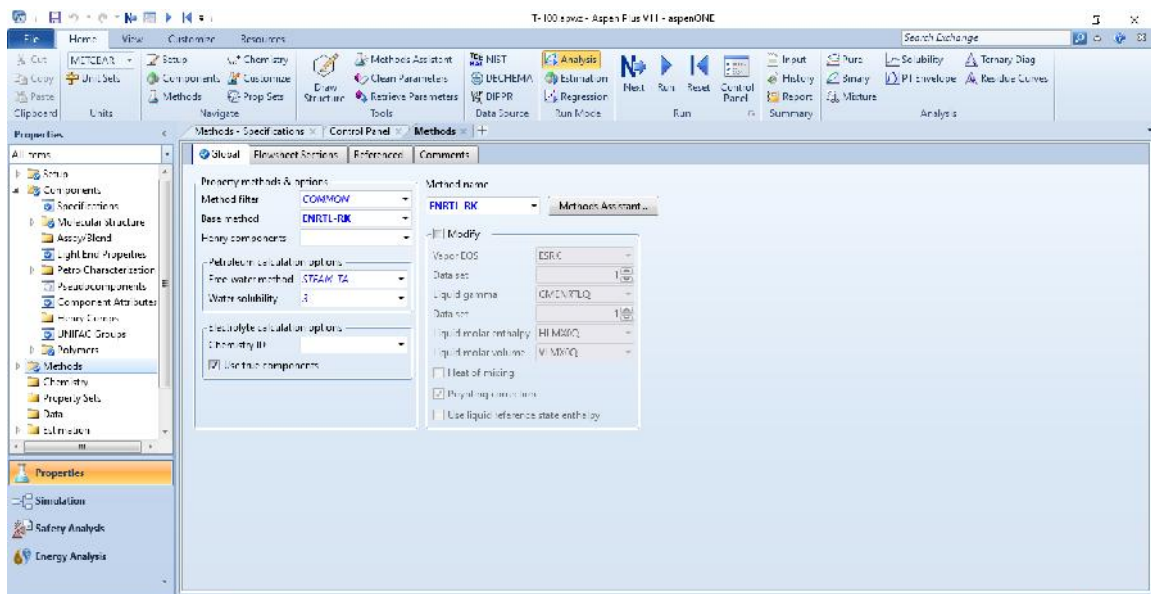
Una vez con los datos cargados, se corre la simulación para obtener los balances de materia y se procede a la activación del análisis de costos.

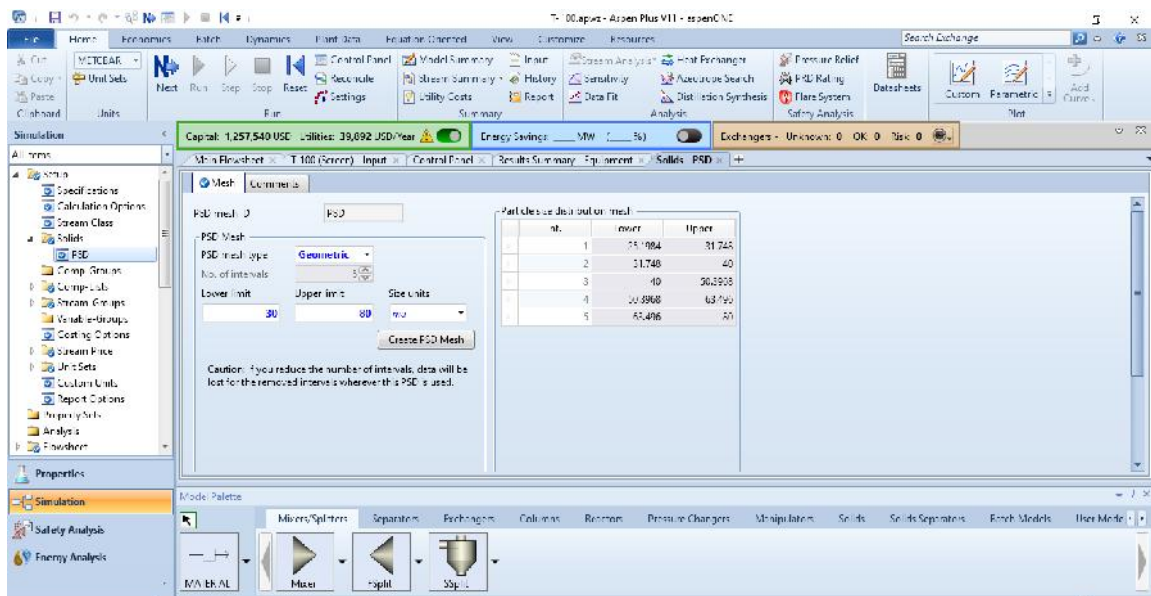


A.1.4. Tamizado

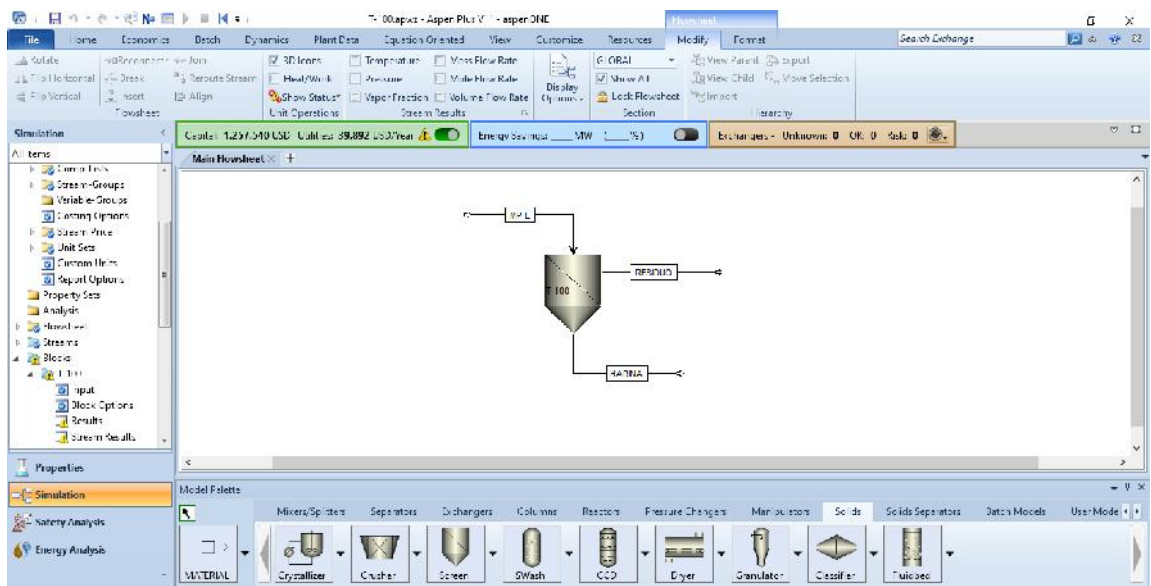
Debido a que la naturaleza de esta operación es similar a la anterior, los pasos iniciales de determinación de componentes, elección de método termodinámico y especificaciones de sólidos es igual. La única diferencia se da en la colocación de los tamaños de partícula en la sección PSD Mesh, ya que ahora se basa en los parámetros que se ingresaron para el molino.



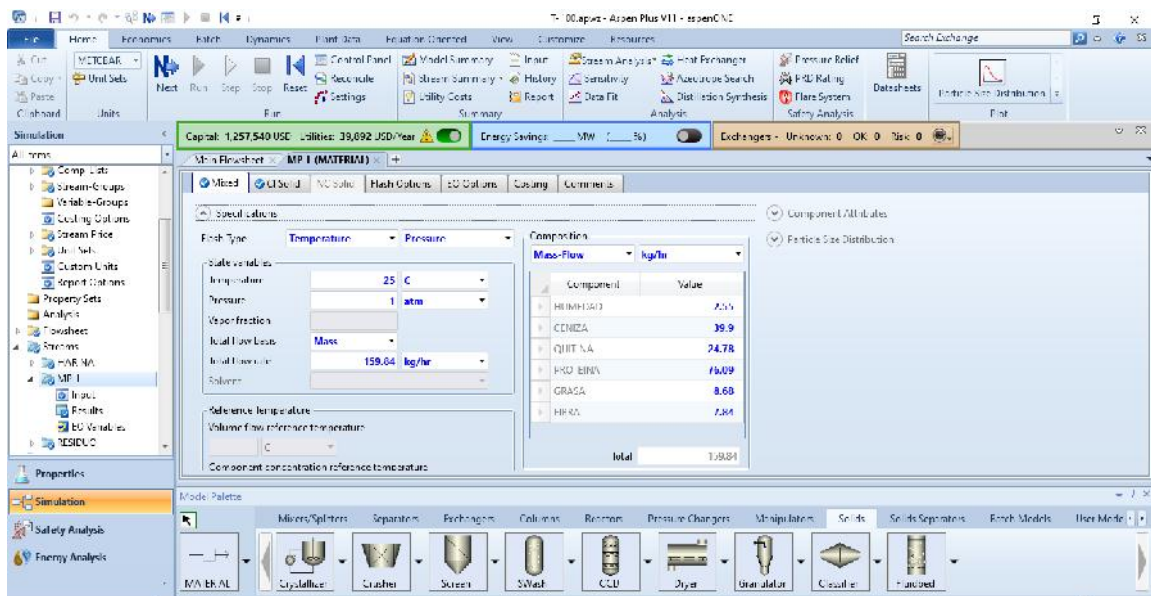




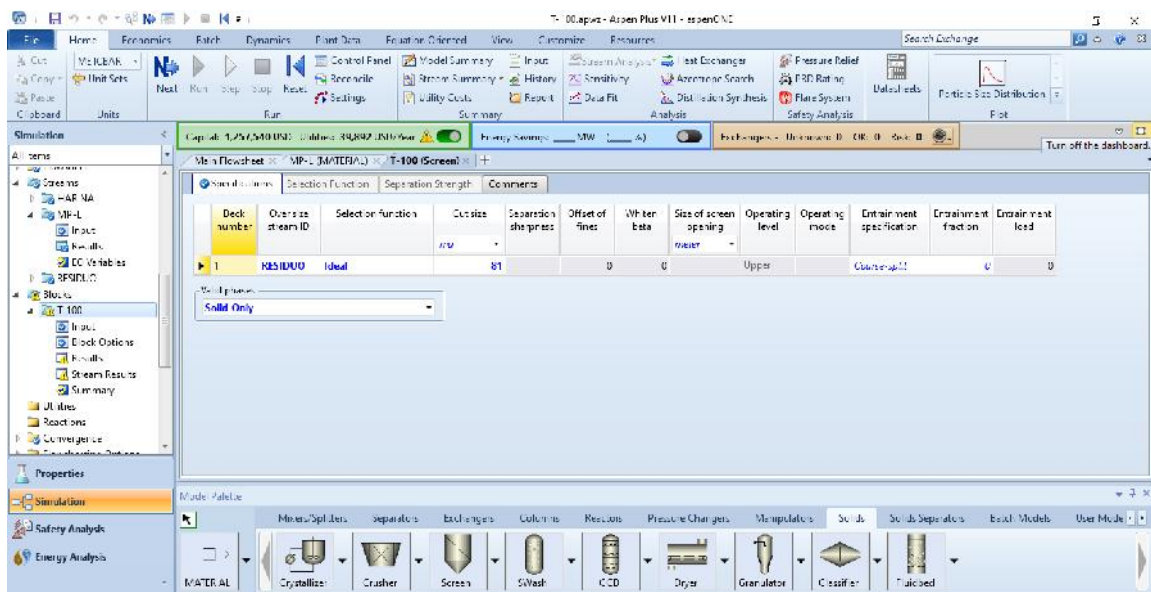
Al momento de elegir el equipo se elige el equipo Screen en la sección de sólidos, para posteriormente ingresar la corriente HARINA como entrada y las corrientes RESIDUO en la parte superior del tamiz y HARINA-T (Harina Tamizada) en el fondo.



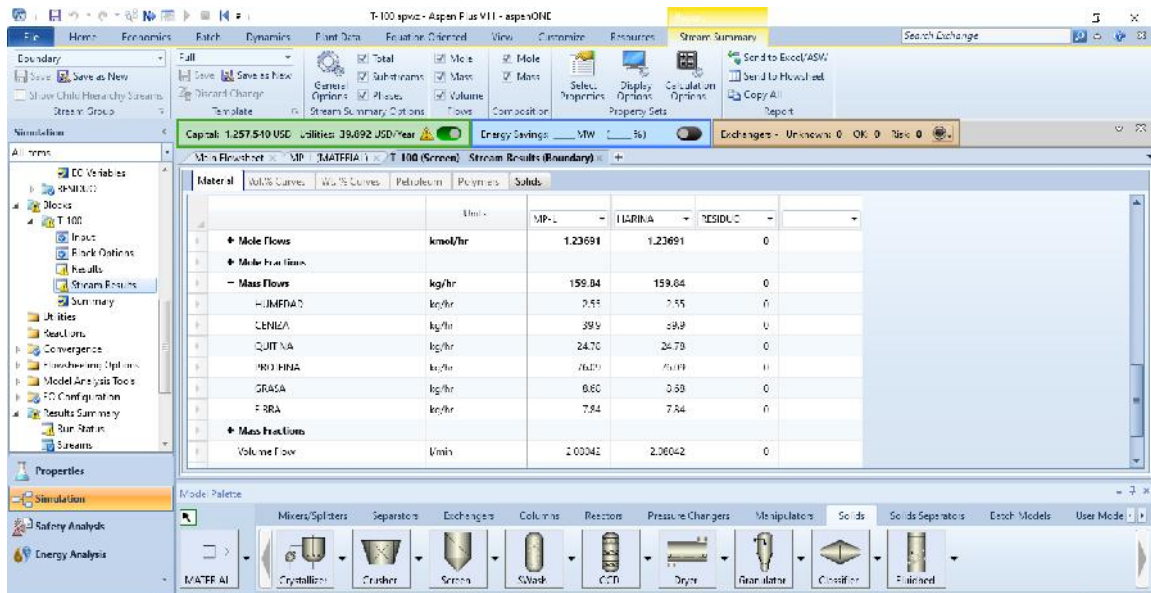
La determinación de la corriente de entrada se hace con los datos de la operación anterior pero añadiendo la distribución del tamaño de partícula en el área CI Solid.



En cuanto a las condiciones para que se lleve a cabo el tamizado, se establece que se manejarán solamente sólidos. Posteriormente, se da un tamaño ideal de partícula que será al que se le permitirá pasar por el tamiz.

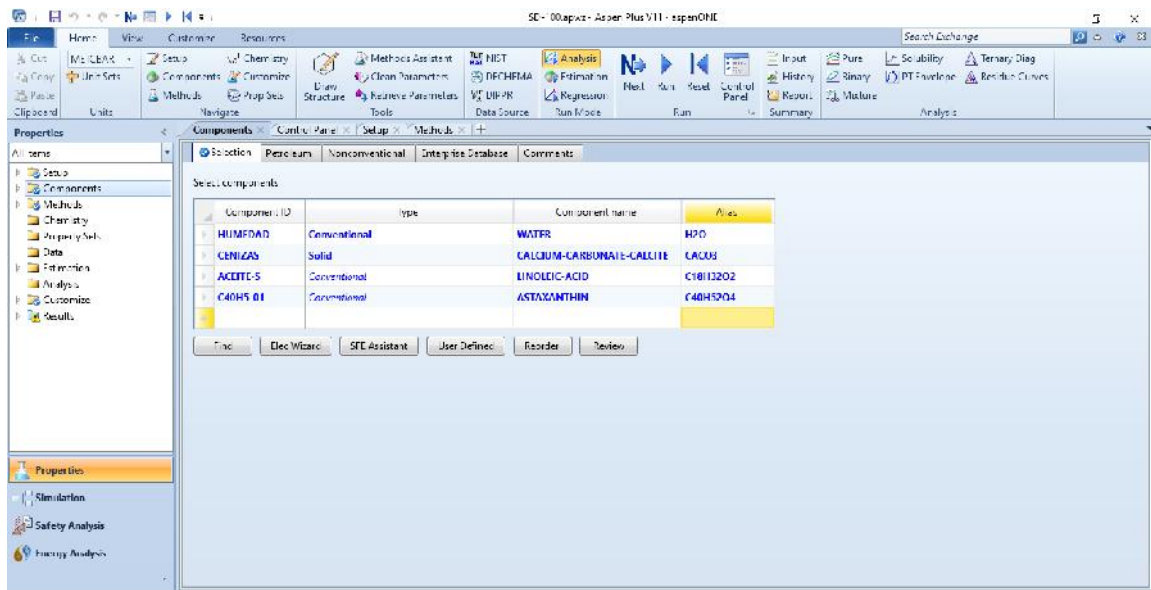


Luego de ello solamente se corre la simulación y se activa el análisis de costos para tener los resultados finales.

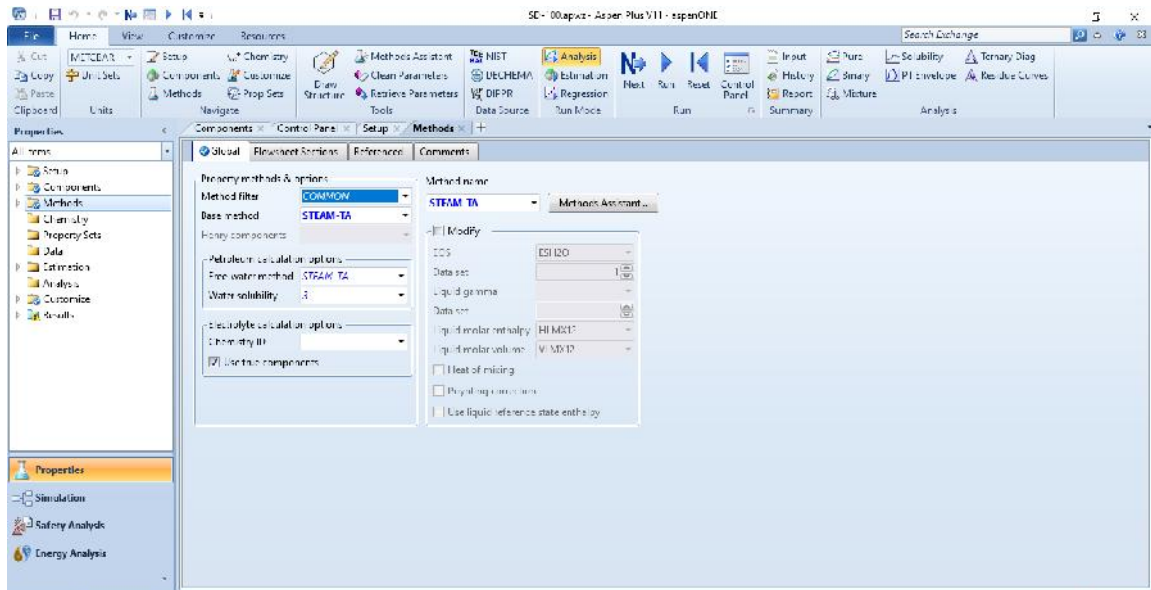


A.1.5. Extracción

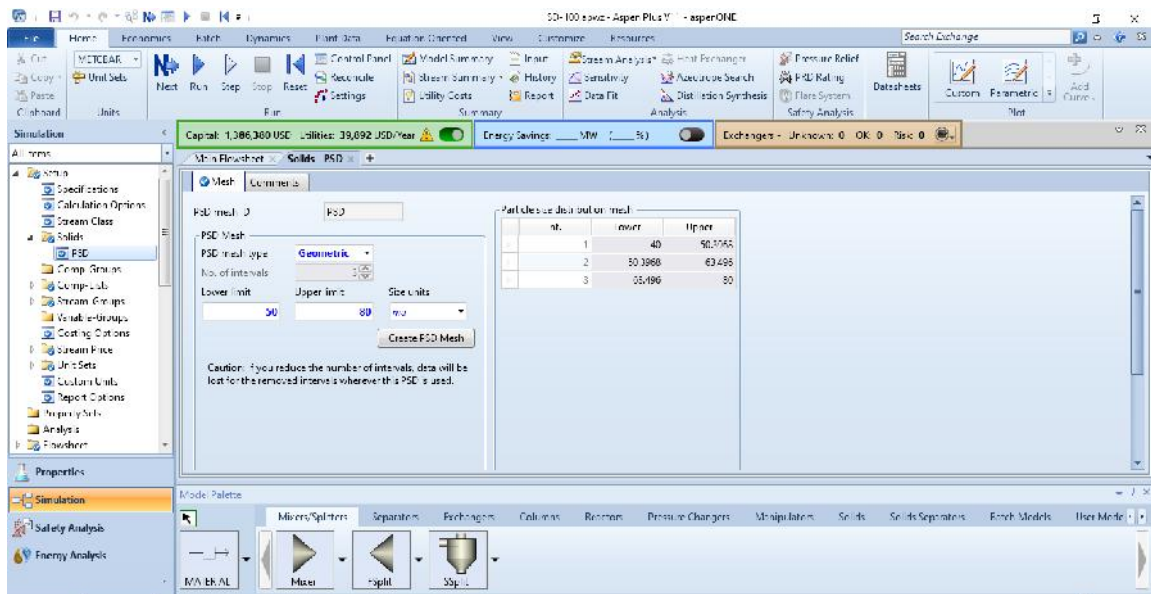
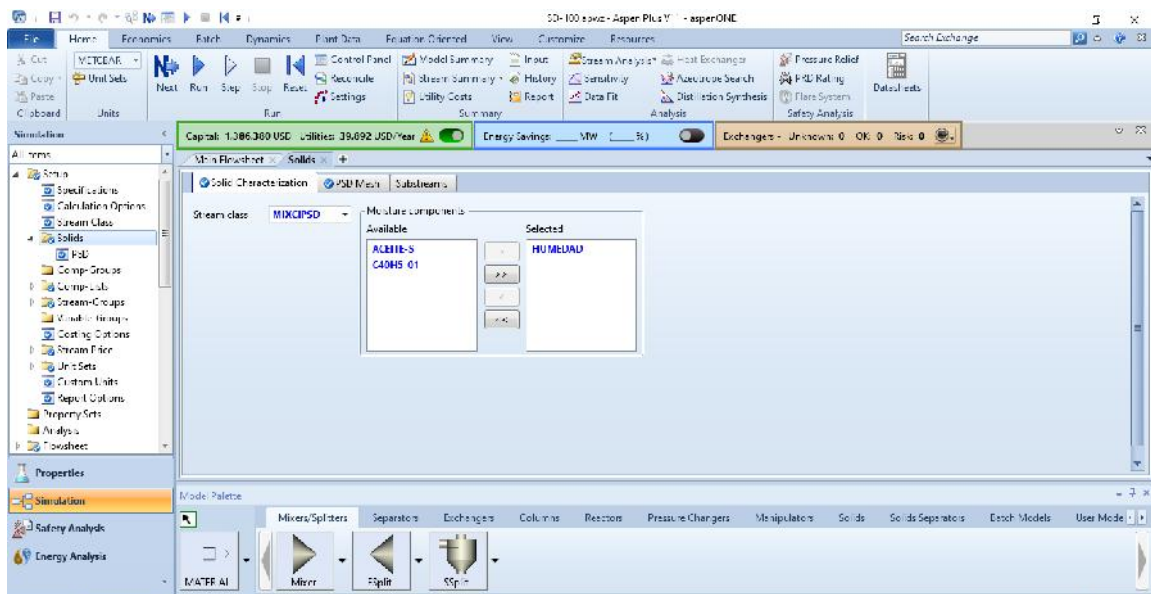
Para esta operación se ingresan menos componentes al inicio, ya que al ponerlos todos, éstos interfieren al momento de correr la simulación. Los componentes ingresados son agua, carbonato de calcio, astaxantina y ácido linoleico (aceite de soya) como el líquido de extracción.



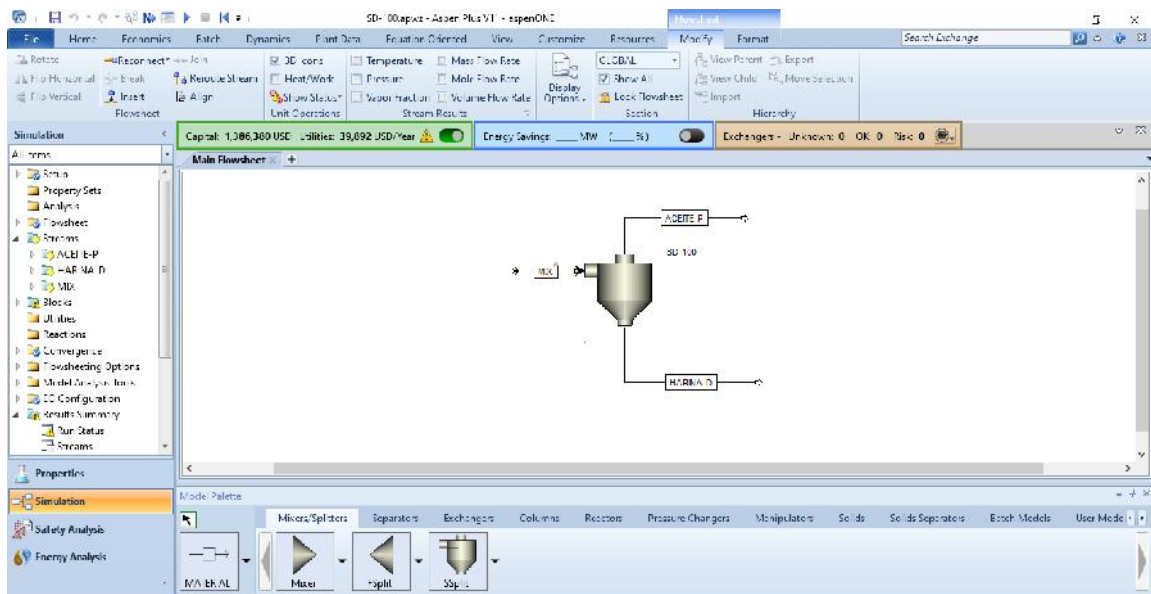
El método en este caso es STEAM-TA. El cambio se debe a las condiciones manejadas en esta operación, así como a la naturaleza de la misma. Esto es importante ya que el(a) usuario(a) del software debe buscar lo que coordine mejor con la base de datos necesaria para realizar los cálculos.



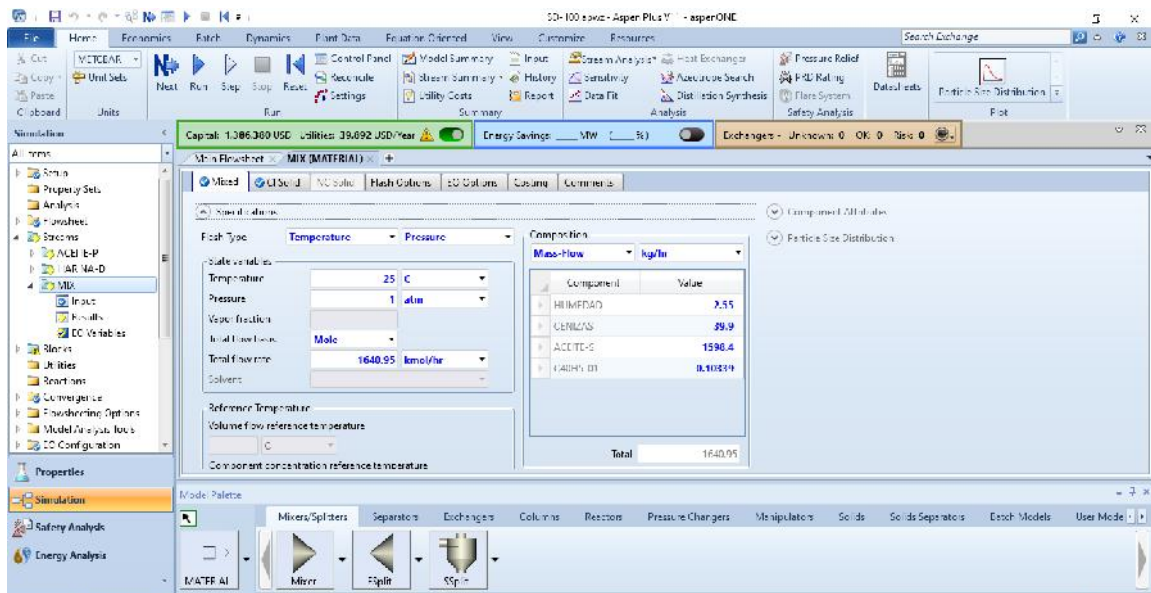
Una vez en el área de Simulación nuevamente se hace el establecimiento de sólidos en Setup al igual que en los casos anteriores y con los datos obtenidos de la operación de tamizado.

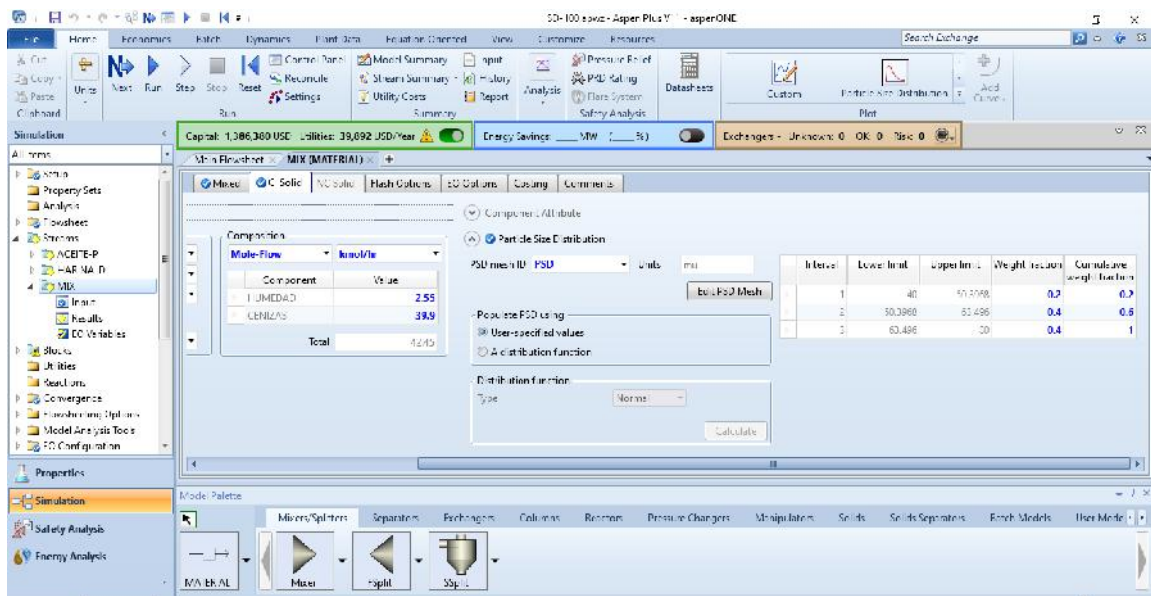
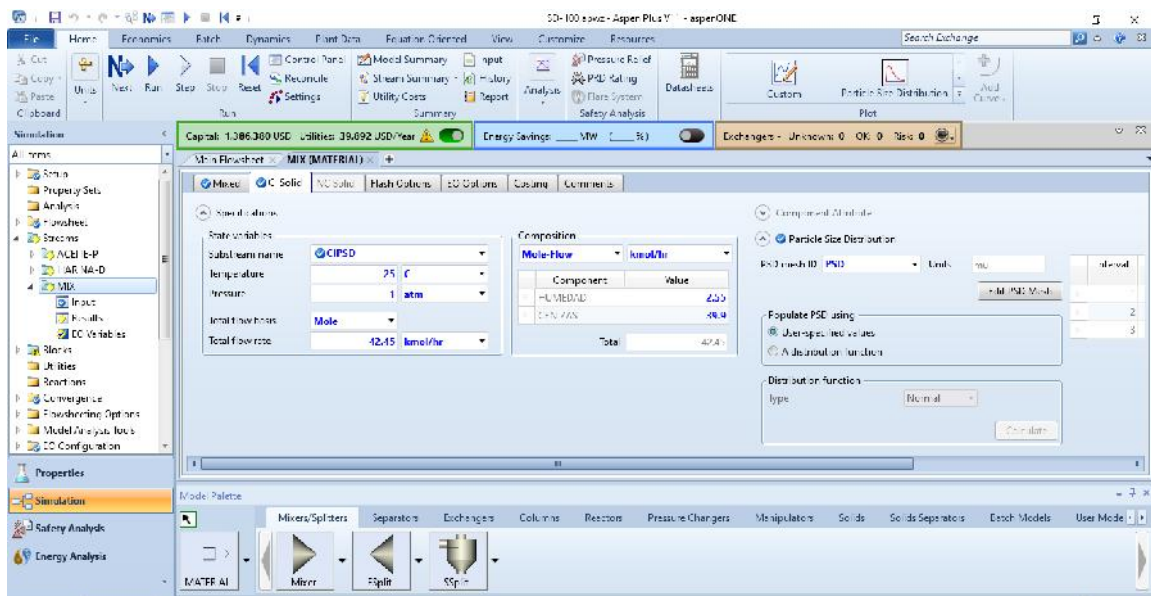


Ya en Main Flowsheet se elige del área de Solids Separators en el sedimentador para luego colocar una corriente de entrada (MIX) y dos de salida (HARINA-D y ACEITE-P).

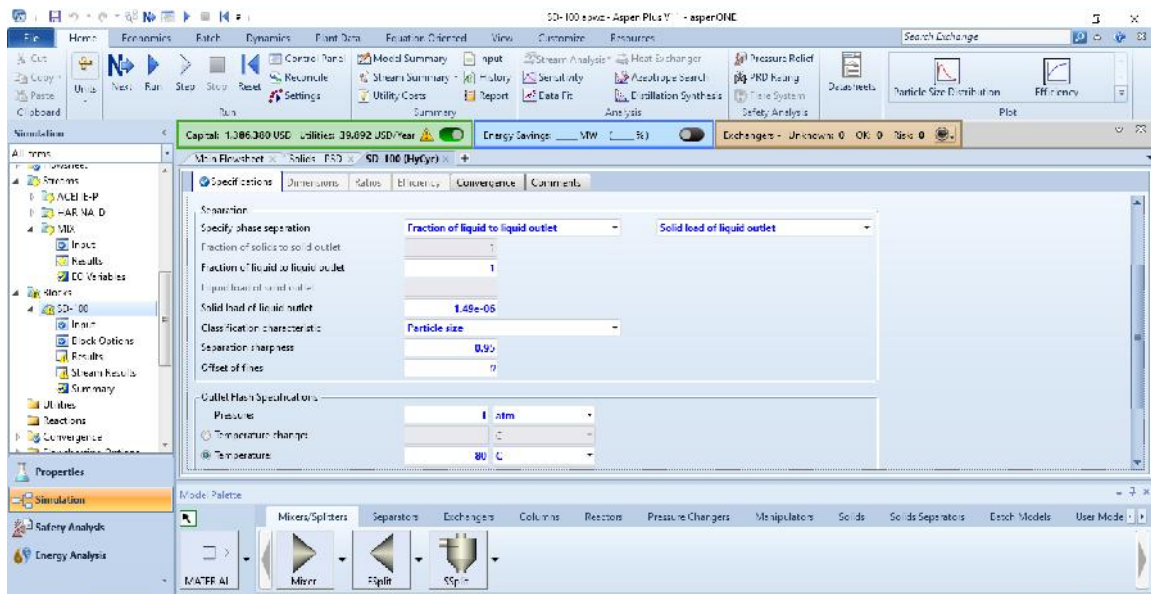
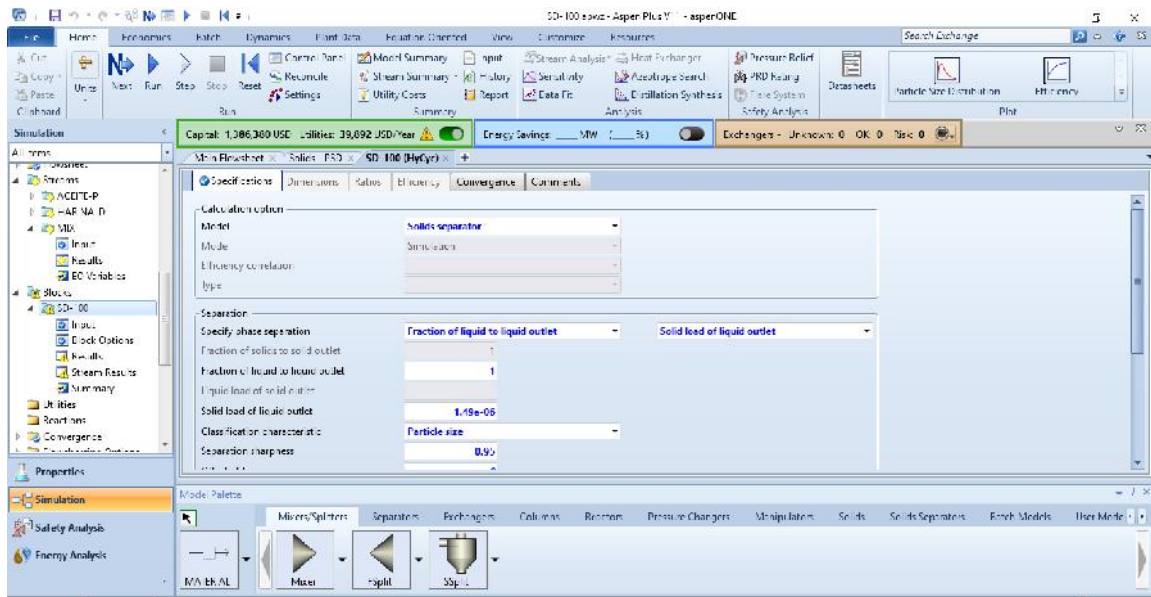


En cuanto a las condiciones de la corriente MIX, en este caso, se trata de la mezcla 1:10 de la harina de residuos de camarón tamizada y aceite de soja. Debido a los sólidos, nuevamente se tiene que establecer la corriente CI Solids con la distribución del tamaño de partícula anterior.

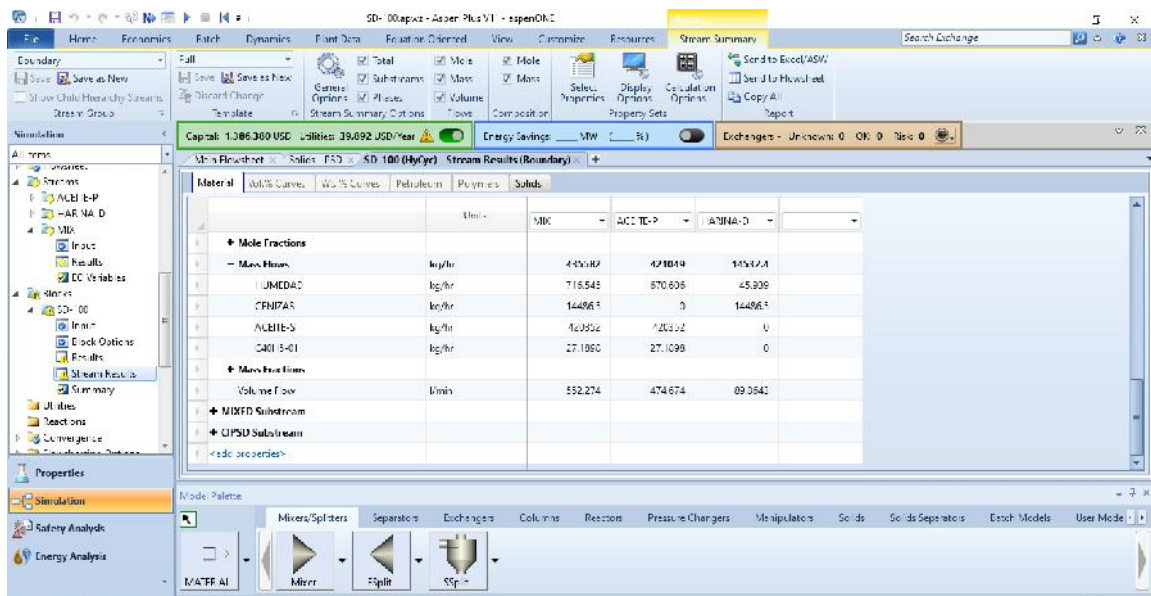




En cuanto a las condiciones del equipo para llevar a cabo la extracción primero se determina que se hará una separación de sólidos con fracciones sólidas y líquidas, usando como característica de clasificación el tamaño de partícula y finalmente las condiciones de temperatura y presión.

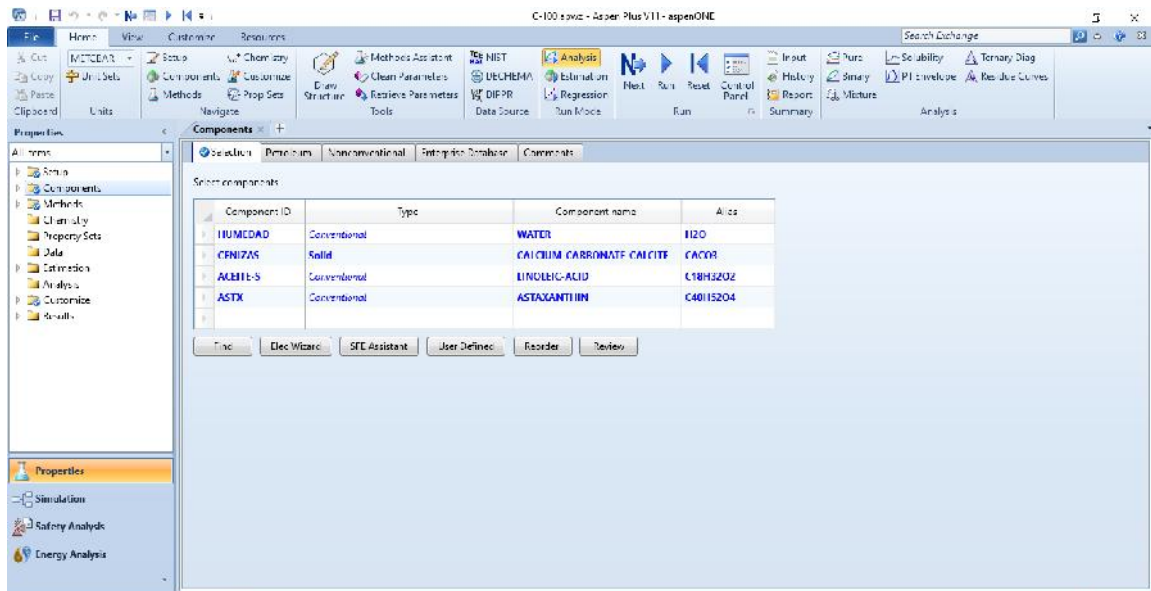


Con ello se corre la simulación y el análisis de costos para tener los resultados finales.

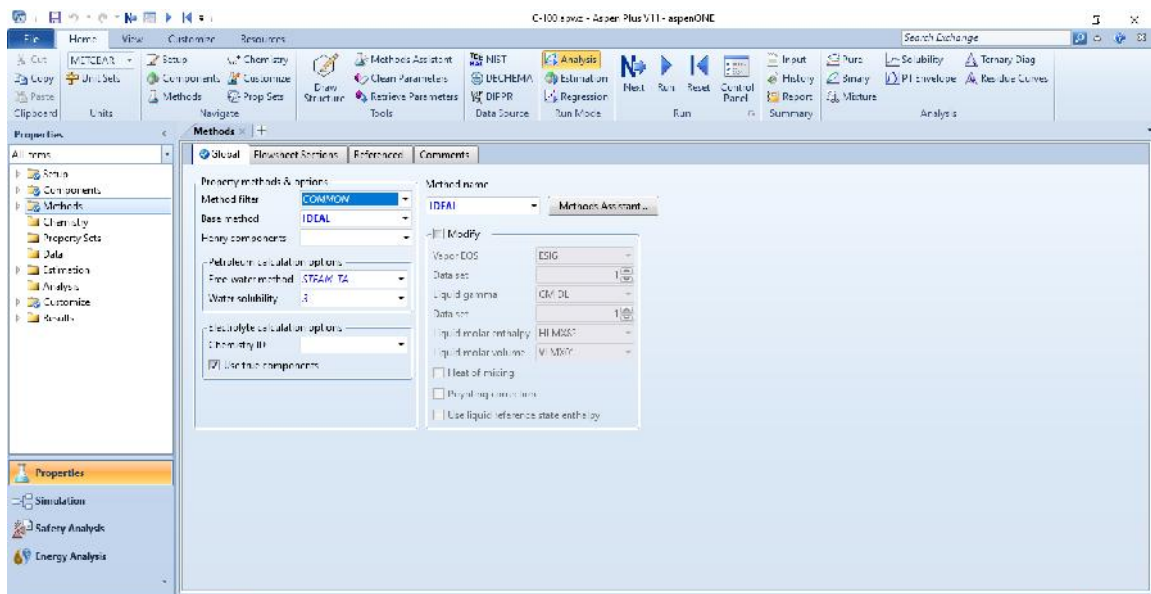


A.1.6. Centrifugación

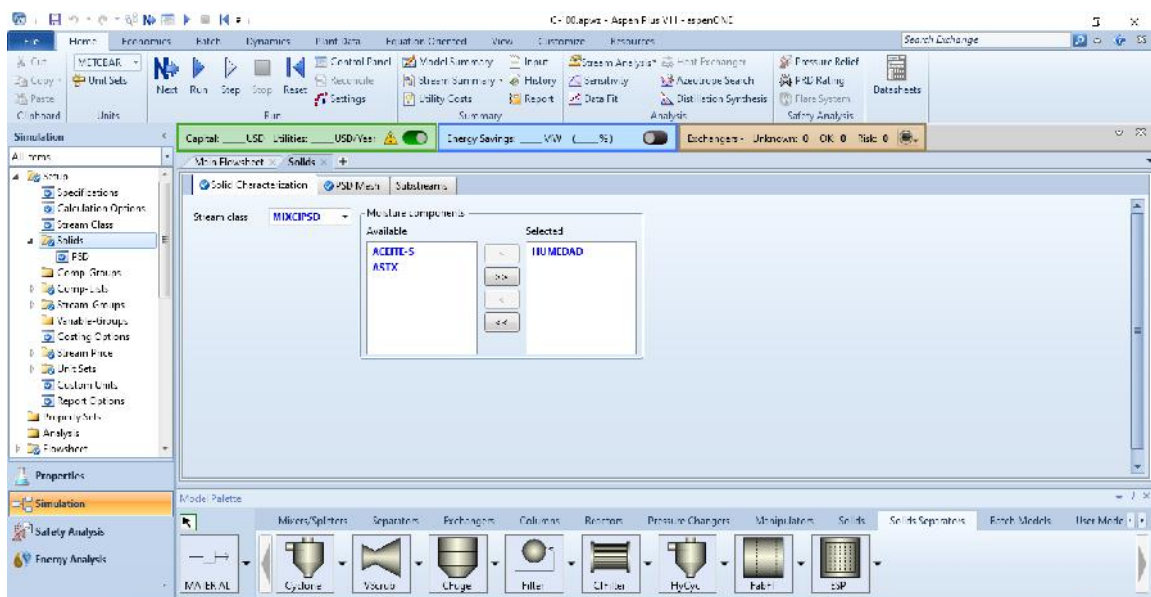
Para esta operación la selección de componentes se hace tal como en la extracción debido a que son acciones consecutivas.

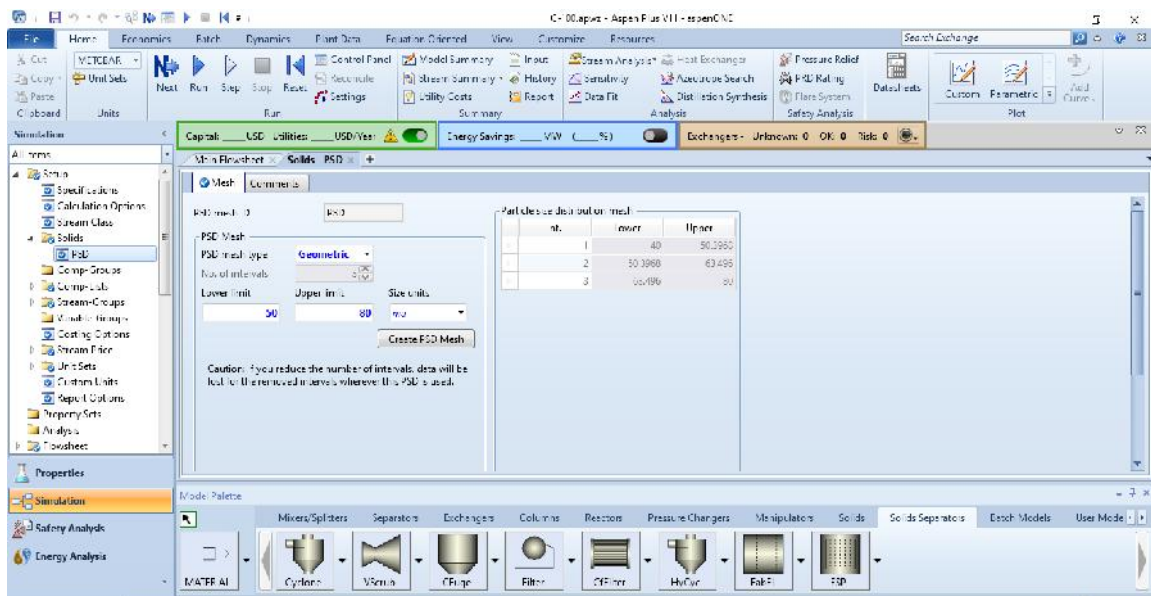


El método termodinámico IDEAL es el que nos permite hacer los cálculos para determinar la correcta separación de las fases.

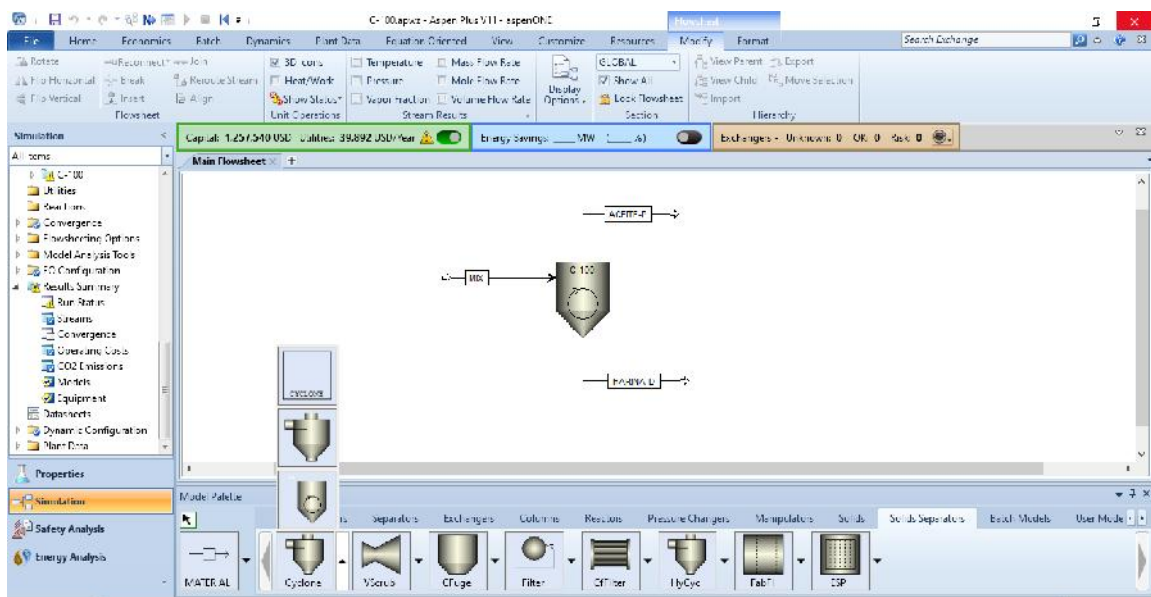


Nuevamente se realiza la especialización por la ceniza contenida en forma de sólidos, brindando el rango de tamaño de partícula como en las condiciones anteriores.

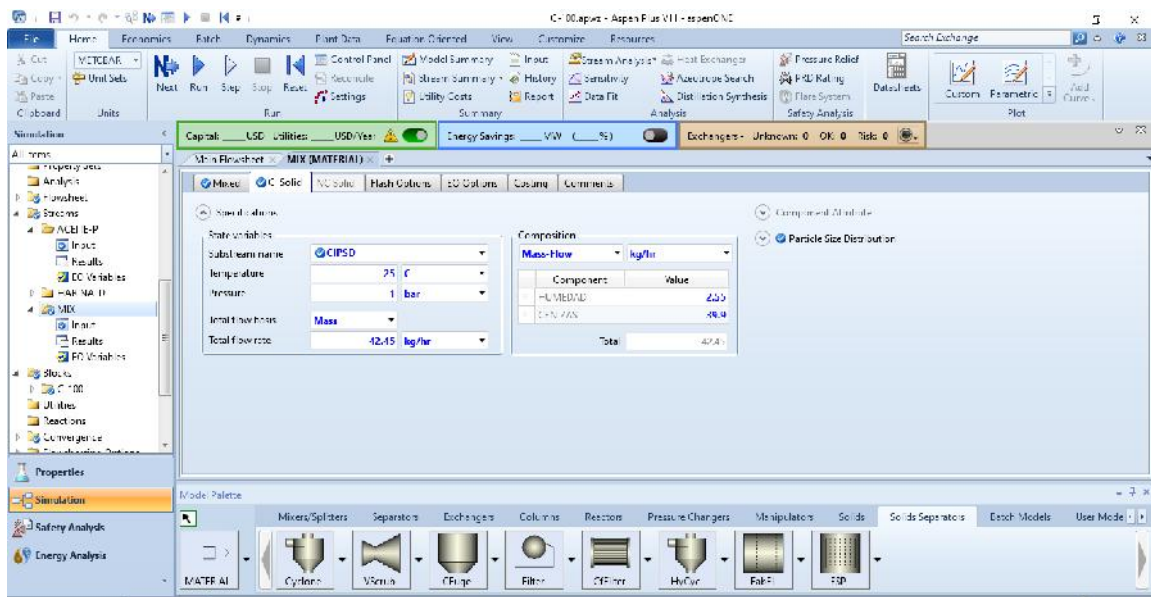
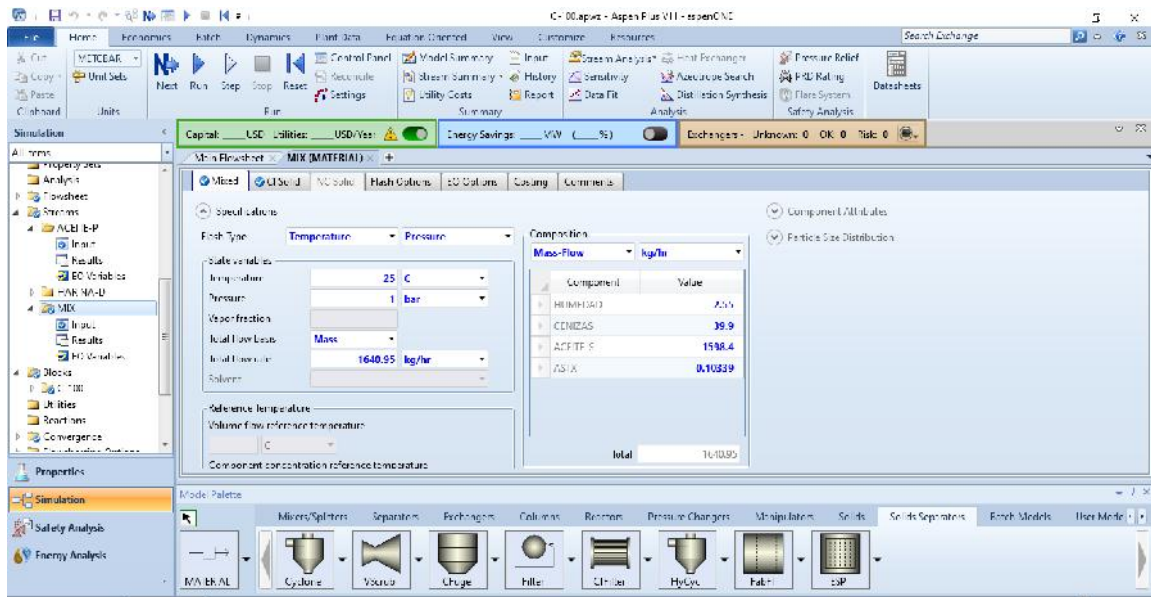




En cuanto al equipo que se colocará en el diagrama, se elige una de las variantes del Cyclone ubicado en Solids Separators, siendo necesarias 3 corrientes, 1 de entrada y dos de salida, tal y como se hizo anteriormente.



Se realiza la caracterización de la corriente MIX igual que antes con las especificaciones para la fracción sólida tal cual.



Al igual que en los casos anteriores, se ingresan las especificaciones para el equipo para poder proceder a correr la simulación y el análisis económico para tener los resultados finales.

C:\00apwz - Aspen Plus V11 - aspenOH2

Stream Summary

Caprol: USD Utilities: USD/Year Energy Savings: VW (%) Exchanges: Unknown: 0 OK 0 Tols: 0

Material Heat Load Work Vol% Curves Vol% Curves Fractions Polymers Solids

| Material | Heat | Load | Work | Vol% Curves | Vol% Curves | Fractions | Polymers | Solids |
|------------------|------|------|-------|-------------|-------------|-------------|----------|-------------|
| Mole Fractions | | | | | | | | |
| — Mass Flow | | | | | | | | |
| UMEDAD | | | kg/hr | | | 1665.4 | 0 | 1665.4 |
| FNIPAR | | | kg/hr | | | 5.09999 | 0 | 5.09999 |
| ALH1E-S | | | kg/hr | | | 70.7990 | 0 | 70.7990 |
| ASTX | | | kg/hr | | | 1298.4 | 0 | 1298.4 |
| — Mass Fractions | | | | | | | | |
| UMEDAD | | | | | | 0.00002950 | 0 | 0.00002950 |
| FNIPAR | | | | | | 0.047404 | 0 | 0.047404 |
| ALH1E-S | | | | | | 0.051900 | 0 | 0.051900 |
| ASTX | | | | | | 6.14172e-03 | 0 | 6.14172e-03 |

Mode Palette: Mixers/Splitters Separators Exchanges Columns Reactors Pressure Changers Manipulators Solids Solids Separators Dash Models User Models

M/ATFE AI Mixer Splitter SS

ANEXO 2

Disposición controlada de los residuos producidos en esta investigación

Esta investigación fue teórica y no se produjeron residuos al menos por la parte de lo realizado en el tiempo en que se llevó a cabo.

Habría que considerar el uso de la electricidad para los equipos de cómputo y los contaminantes que se producen en las plantas que la generan, sean termoeléctricas, carboeléctricas o nucleoeeléctricas y medir la huella de carbono de esta investigación en esta tesitura.

Por último, los equipos en que se trabajó (computadora personal, impresora para entregar los documentos al Departamento de Exámenes Profesionales de la Facultad de Química, etc., etc.) usan partes de recambio que deben disponerse al término de su vida útil. El papel en el que se imprimirá este documento y los que se requieran para la titulación fueron fabricados a partir de una fuente de celulosa y deberá también considerarse el impacto ambiental correspondiente, así como el de los cartuchos de tinta, etc.

Es claro que cualquier actividad que realicen los seres humanos tiene un impacto ambiental y, por ello, debemos siempre actuar de manera responsable y consciente para minimizar este impacto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ambati, R.R., Phang, S.M., Ravi, S., Aswathanarayana, R.G. 2014. Astaxanthin: Sources, extraction, stability, biological activities and its commercial applications—A review. *Marine Drugs*. 12(1):128-152.

Andersen, L.P., Holck, S., Kupcinkas, L., Kiudelis, G., Jonaitis, L., Janciauskas, D., Permin, H., Wadström, T. 2007. Gastric inflammatory markers and interleukins in patients with functional dyspepsia treated with astaxanthin. *Pathogenesis and Host Response in Helicobacter Infections*. 50(2):244-248.

Arias-Torres, O., Mendoza-Márquez, A.M., Bárcenas-Ochoa, E.M., Flores, R., García-Gómez, R.S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2013. Comparación de diferentes agentes plastificantes adicionados en esponjas de quitina obtenidas de cefalotórax de camarón. *Química Central (Revista de la Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Central del Ecuador)*. 3(1):11-18. ISSN 1390-5562.

<http://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/QUIMICA/article/view/1200>

Auerswald, L., Gäde, G. 2008. Simultaneous extraction of chitin and astaxanthin from waste of lobsters *Jasus lalandii*, and use of astaxanthin as an aquacultural feed additive. *African Journal of Marine Science*. 30(1):35-44.

Barbosa-Saldaña, M.deL., Díaz-Jaimes, P., Uribe-Alcocer, M. 2012. Variación morfológica del camarón café (*Farfantepenaeus californiensis*) en el Pacífico mexicano/*Morphological variation of brown shrimp (Farfantepenaeus californiensis) in Mexican Pacific (Ocean)*. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 83(1):42-50.

Barreiro, C. D. 2018. *Carotenoids Production: A Healthy and Profitable Industry*. Ed. Humana Press. P. 45-55. New York, Estados Unidos.

Barrera-Rodríguez, S., Flores-Ortega, R.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2006. Extracción de quitina del cefalotórax de camarón para la elaboración de películas / *Chitin extraction from shrimp cephalothorax and exoskeleton for films preparation*. Vol. 10, Serie: *TECNOLOGÍAS más LIMPIAS*. Pub. AMCATH y Laboratorios 301, 302, 303 de Ing. Quím. Amb. y de Quím. Amb. Facultad de Química, UNAM. ISBN 978-607-7807-08-0. 75 pags. México D.F. México. 1ª Ed. Disco compacto, 50 ejemplares/exemplars (2006). 2ª Ed. Disco compacto, 50 ejemplares/exemplars (2007). 3ª Ed. Mejorada. Disco compacto (2011)

Benavente, M., Sánchez, M., Hernández, D., Escorcía, D. 2009. Diseño y montaje de una Planta Piloto para la extracción de quitina y proteínas. *Nexo*. 22(02):45-55.

Borja-Urzola, A.delC., García-Gómez, R.S., Bernal-González, M., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2021. Chitosan-calcite from shrimp residues: A low-cost adsorbent for three triazines removal from aqueous media. *Materials Today Communications*. 26:102131.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102131>

Borja-Urzola, A.delC., García-Gómez, R.S., Flores-Ortega, R.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2020a. Chitosan from shrimp residues with a saturated solution of calcium chloride in methanol and water. *Carbohydrate Research*. 497: 108116.
<https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.108116>

Borja-Urzola, A.delC., Bernal-González, M., García-Gómez, R.S., Flores-Ortega, R.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2020b. Adsorción de triazinas por quitosana obtenida de residuos de camarón empleando una mezcla de cloruro de calcio/metanol/agua como disolvente / *Triazines adsorption by chitosan obtained from shrimp waste by a calcium chloride/methanol/water mixture as a solvent*. *InfoANALÍTICA (Ecuador)*. 8(2):181-205.

Bueno-Solano, C., López-Cervantes, J., Campas-Baypoli, O. N., Lauterio-García, R., Adan-Bante, N.P., Sánchez-Machado, D.I. 2009. Chemical and biological characteristics of protein hydrolysates from fermented shrimp by-products. *Food Chemistry*. 112(3):671-675.

Cahú, T.B., Santos, S.D., Mendes, A., Córdula, C.R., Chavante, S.F., Carvalho, J.L.B., Nader, H.B., Bezerra, R.S. 2012. Recovery of protein, chitin, carotenoids and glycosaminoglycans from Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) processing waste. *Process Biochemistry*. 47(4):570–577.

Calderón-Villagómez, H.E., González-Piña, G., Pérez-Mendoza, V.M., Jáber, C., Durán-de-Bazúa, C. 1992. Reaprovechamiento de cabezas de camarón, un proyecto con futuro. *Rev. IMIQ*. 33(Mayo-Junio):44-57. ISSN 0188-7319.

Can, Q., Turner, C. 2009. Extraction of astaxanthin from shrimp waste using pressurized hot ethanol. *Chromatographia*. 70(1-2):247-251.

Cañipa, A.J., Escobedo, G., García, R.S., Gálvez, A., Durán-de-Bazúa, C. 1998. Producción de pigmentos, quitina y quitosana a partir de residuos de la industria camaronera. Parte 1: Separación química de pigmentos y quitina y producción de quitosana. *Industria Alimentaria*. 20(6):28-38. ISSN 0187-7658

Cañipa-Morales, A.J., Escobedo-Olea, G., Gálvez, A., Durán-de-Bazúa, C. 1994. Aprovechamiento integral de los residuos del camarón. *Vol. 2, Serie: TECNOLOGÍAS más LIMPIAS*. Pub. Prog. Ing. Quím. Amb. y de Quím. Amb. 152 pags. Facultad de Química, UNAM. ISBN 968-36-4104-0. México D.F. México. 50 ejemplares/exemplars, 1ª Ed. (1994). 100 ejemplares/exemplars 2ª Ed. mejorada, Arnaldo Jimmy Cañipa Morales, Carmen Durán-de-Bazúa, Gabriela Escobedo-Olea, Amanda Gálvez-Mariscal, Rolando García-Gómez (2000).

Carranza-Díaz, O. 2021. Uso sustentable del agua en granjas camaronícolas / *Sustainable use of water in shrimp farms*. En *Sustainability and development: 1.Socioecological aspects / Sustentabilidad y desarrollo: 1. Aspectos socioecológicos*. María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, ed. Cap. 4. Pp. 109-124. Eón Sociales. Eón-DAAD-UNAM. Ediciones y Gráficos Eón, S.A. de C.V. ISBN 978-607-8732-42-5. Ciudad de México, México.

Casariago, A., Díaz, R., Sergrañes, Y., Nieto, O.M., Durán, C., López, N., Rodríguez, M., González, J. 2009. Modelación de las propiedades mecánicas de películas de quitosana. *Ciencia y Tecnología de Alimentos (Cuba)*. 19(1):7-12. (ISSN 0864-4497).

Chougle, J.A., Bankar, S.B., Chavan, P.V., Patravale, V.B., Singhal, R.S. 2016. Supercritical carbon dioxide extraction of astaxanthin from *Paracoccus NBRC 101723*: Mathematical modelling study. *Separation Science & Technology*. 51(13):2164-2173.

CONAFAB. 2021. *Acuicultura, impulsa el auge de la producción pescados y mariscos en México*. (en línea) [Fecha de consulta 07 de septiembre de 2021]. Dirección electrónica. http://www.conafab.org/images/comunicados/19_04_2021_acuicultura_impulsa_el_auge_de_la_pesca_mexicana.pdf

CONAPESCA. 2009. *Plan maestro de camarón de altamar del estado de Sinaloa* (en línea) [Fecha de consulta 20 de agosto de 2020]. Dirección electrónica. https://cadenasproductivas.conapesca.gob.mx/pdf_documentos/comites/csp/Programa_Maestro_Estatal_CamaronAltamar_Sinaloa.pdf

CONAPESCA. 2020. *Produjo México 47 mil 664 toneladas de camarón en la temporada de captura 2019-2020: Agricultura*. (en línea) [Fecha de consulta 26 de diciembre de 2020]. Dirección electrónica. <https://www.gob.mx/conapesca/es/articulos/produjo-mexico-47-mil-664-toneladas-de-camaron-en-la-temporada-de-captura-2019-2020-agricultura?idiom=es>

Deng, J.-J., Mao, H.-H., Fang, W., Li, Z.-Q., Shi, D., Li, Z.-W., Zhou, T., Luo, X.-C. 2020. Enzymatic conversion and recovery of protein, chitin, and astaxanthin from shrimp shell waste. *Journal of Cleaner Production*. 271:1-10.

DOF. 2009. Diario Oficial (Primera Sección). Modificación del inciso 0, el encabezado de la Tabla 13, el último párrafo del Anexo B y el apartado Signo decimal de la Tabla 21 de la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema general de unidades de medida. CUARTO.- Se modifica el encabezado de la tabla 13 para quedar como sigue: Tabla 21 –

Reglas para la escritura de los números y su signo decimal. Signo decimal: El signo decimal debe ser una coma sobre la línea (,) o un punto sobre la línea (.). Si la magnitud de un número es menor que la unidad, el signo decimal debe ser precedido por un cero. Diario Oficial de la Federación: Jueves 24 de septiembre de 2009. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.

Donoso, A., González-Durán, J., Agurto-Muñoz, A., González, P.A., Agurto-Muñoz, C. 2021. Therapeutic uses of natural astaxanthin: An evidence-based review focused on human clinical trials. *Pharmacological Research*. 166:105474, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.phrs.2021.105479>

Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC., García-Gómez, R.S., Borja-Urzola, A.delC., Tlelo-Bárcena, B., Mendoza-Pérez, S., Hernández-Morales, M.R., Ortiz-Ramírez, J.A., Roé-Sosa, A., Amábilis-Sosa, L.E., Navarro-Frómata, A.E., Navarrete-Rosas, D., Flores-Ortega, R.A., Sánchez-Tovar, S.A., Solís-Fuentes, J.A. 2021. Desarrollo sustentable de microagroempresas para combatir la pobreza en las comunidades, áreas campesinas y pescadoras / *Sustainable development of microagribusinesses to overcome poverty in communities, peasant and fishing areas*. En *Sustainability and development: 1.Socioecological aspects* / Sustentabilidad y desarrollo: 1. Aspectos socioecológicos. María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, ed. Cap. 19. Pp. 481-522. Eón Sociales. Eón-DAAD-UNAM. Ediciones y Gráficos Eón, S.A. de C.V. ISBN 978-607-8732-42-5. Ciudad de México, México.

Durán-Olvera, J.M., Magaña-Pérez, G., Ayala-Tirado, R.C., García-Gómez, R.S., Amábilis-Sosa, L.E., Durán-de-Bazúa, M.delC., Solís-Fuentes, J.A. 2016. Uso de quitina y quitosana procedentes de residuos de camarón en la purificación de jugos de caña (*Saccharum officinarum*). *Química Central* (Revista de la Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Central del Ecuador). 5(1): 27-40.

Escobedo, G., García, R.S., Rosas, J., Cañipa, A.J., Gálvez, A., Durán-de-Bazúa, C. 1999. Producción de pigmentos, quitina y quitosana a partir de residuos de la industria camaronera.

Parte 2: Separación enzimática de quitina y producción de quitosana. *Industria Alimentaria*. 21(1):14-24. ISSN 0187-7658.

FAO. 2018. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2018*. (en línea) [Fecha de consulta 06 de mayo de 2021]. Dirección electrónica.

<http://www.fao.org/documents/card/en/c/I9540EN>

FAO. 1995. *Guía FAO para la identificación de especies para los fines de la pesca*. Ed. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. P. 418. Roma, Italia.

Flores, R., Barrera-Rodríguez, S., Shirai, K., Durán-de-Bazúa, C. 2007. Chitin sponge, extraction procedure from shrimp wastes using green chemistry. *J. Appl. Polym. Sci.* 104:3909-3916.

Flores, R., Barrera-Rodríguez, S., Shirai-Matsumoto, C.K., Durán-de-Bazúa, C. 2006. Obtención de esponjas de quitina a partir de cefalotórax de camarón para empaques. *AlimenPack*. 2(4):26-28.

Flores-Ortega, R.A. 2008. *Obtención y caracterización de esponja de quitina a partir de cefalotórax de camarón*. Tesis de Doctor en Ciencias, Facultad de Química, UNAM. Ciudad de México, México.

Flores-Ortega, R.A., Barrera-Rodríguez, S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2004. *Extracción ecológica de quitina y subproductos*. Solicitud de Registro de Patente: Octubre 1, 2004. Facultad de Química, UNAM. IMPI. PA/a/2004/009517. Patente Núm. 264482. Otorgada el 12 de febrero de 2009. Ciudad de México, México.

Gammone, M.A., Riccioni, G., D'Orazio, N. 2015. Carotenoids: Potential allies of cardiovascular health? *Food & Nutrition Research*. 59: 26762. doi: 10.3402/fnr.v59.26762. eCollection 2015. 1-11.

Gao, J., You, J., Kang, J., Nie, F., Ji, H., Liu, S. 2020. Recovery of astaxanthin from shrimp (*Penaeus vannamei*) waste by ultrasonic-assisted extraction using ionic liquid-in-water microemulsions. *Food Chemistry*. 325:1-9.

García, R.S.; Guadarrama, P.C.; Cañipa, A.J., Escobedo, G. Gálvez, A., Durán-de-Bazúa, C. 1999. Producción de pigmentos, quitina y quitosana a partir de residuos de la industria camaronera. Parte 3: Extracción enzimática de carotenoproteínas. *Industria Alimentaria*. 21(2):27-28,30-39,42-43. ISSN 0187-7658

García-Gómez, R.S., Casariego-Año, A., Flores-Ortega, R.A., Jiménez-Espinosa, M.S., Luna-Rodríguez, A., Ramírez-Cruz, M.A., Pedroza-Islas, R. y Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2004. Aprovechamiento integral de los residuos del camarón y otros crustáceos: Fuente de pigmentos y polímeros naturales. *Revista del IMIQ (México)*. 45(3-4):5-13.

García-Gómez, R.S., Tlelo-Bárcena, B., Borja-Urzola, A.delC., Flores-Ortega, R.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2021. Reaprovechamiento integral de subproductos del mar: Un proceso sustentable para evitar la pobreza en México y otros países con litorales / *Comprehensive reuse of marine by-products: A sustainable process to avoid poverty in Mexico and other countries with coastlines*. En *Sustainability and development: 1. Socioecological aspects / Sustentabilidad y desarrollo: 1. Aspectos socioecológicos*. María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, ed. Cap. 17. Pp. 429-462. Eón Sociales. Eón-DAAD-UNAM. Ediciones y Gráficos Eón, S.A. de C.V. ISBN 978-607-8732-42-5. Ciudad de México, México.

García-Luna-Pérez, I.J., Vargas-Cid, Y.E., García-Gómez, R.S., Mendoza-Pérez, S., Solís-Fuentes, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2019. Vida de anaquel de uvas rojas (*Vitis vinífera* L.) de la variedad globo rojo recubiertas con mezclas de quitina-quitosana de residuos de camarón. *Industria Alimentaria*. 41(5):34-45a,b.

García-Montiel, A.L., García-Gómez, R.S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2018. Estudio del efecto de biopelículas extraídas de residuos de la industria camaronera sobre algunas características del jitomate (*Lycopersicum esculentum*) / *Study of some effects of biofilms extracted from residues of the shrimp industry on tomatoes (Lycopersicum esculentum)*. **Industria Alimentaria**. 40(5):18-29 (2018) ISSN 0187-7658.

García-Montiel, A.L., García-Gómez, R.S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2016. Efecto de la presencia de calcio en la calidad del puré de jitomate (*Lycopersicum esculentum*) elaborado a partir de frutos con recubrimientos naturales / *Effect of the presence of calcium on the quality of tomato (*Lycopersicum esculentum*) puree made from fruits with natural coatings*. **Ambiens Techné et Scientia México**. 4(1):61-71.

González-Piña, G., Pérez-Mendoza, V.M. 1991a. Premio Beca “Clara Porset” / Mención honorífica. Diseño industrial 1991. Fundación Clara Porset. Para la tesis "Molino secador para cabezas de camarón" de la Licenciatura en Diseño Industrial. Asesorados por la Dis. Ind. Cristina Jáber-Monges del Centro de Investigación en Diseño Industrial de la UNAM y por la QFB Hilda Elizabeth Calderón-Villagómez y la Dr.-Ing. Carmen Durán-de-Bazúa del Departamento de Alimentos de la Facultad de Química de la UNAM. Noviembre 30, 1991. Ciudad de México, México.

González-Piña, G., Pérez-Mendoza, V.M. 1991b. Premio Nacional /Primer lugar. Diseño industrial 1991. Mexinox. Para la tesis "Molino secador para cabezas de camarón" de la Licenciatura en Diseño Industrial. Asesorados por la Dis. Ind. Cristina Jáber-Monges del Centro de Investigación en Diseño Industrial de la UNAM y por la QFB Hilda Elizabeth Calderón-Villagómez y la Dr.-Ing. Carmen Durán-de-Bazúa del Departamento de Alimentos de la Facultad de Química de la UNAM. Noviembre 30, 1991. Ciudad de México, México.

Gutiérrez-Cabello, M., García-Gómez, R.S., Sánchez-Zamora, A., Suárez-Bautista, J., Gaxiola-Cortés, G., Chel-Guerrero, L., Durán-de-Bazúa, C. 2009. Aprovechamiento integral de especies acuícolas del sureste de México: Beneficios obtenidos por la pigmentación “natural” de su carne / *Global reuse of Mexico’s southeast aquacultural species: Benefits*

obtained by its flesh “natural” pigmentation. *Carnilac Industrial*. Edición Especial de la Industria Cárnica 2009:32-36. ISSN 0186-6036

Hamed, I., Özogul F., Regenstein J. M. 2016. Industrial applications of crustacean by-products (chitin, chitosan, and chitooligosaccharides): A review. *Trends in Food Science & Technology*. 48:40-50.

Handayani, D., Sutrisno, A., Nani, I., Suryadi, I. 2008. Extraction of astaxanthin from giant tiger (*Panaeus monodon*) shrimp waste using palm oil: Studies of extraction kinetics and thermodynamic. *Bioresource Technology*. 99(10):4414-4419.

Haydary, J. 2019. *Chemical process design and simulation : Aspen Plus and Aspen Hysys applications*. Ed. John Wiley & Sons. P. 3. Nueva Jersey, Estados Unidos.

Jiménez-Espinosa, M. S. 2003. *Comparación de dos métodos de extracción sólido-líquido para la obtención de pigmentos carotenoides a partir del cefalotórax de camarón*. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.

Jiménez-Pichardo, R. 2009. *Extracción y estabilización de astaxantina obtenida a partir de residuos ensilados de camarón*. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.

José-González, V., García-Gómez, R.S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2016. Efectos en la vida de anaquel de jugos de toronja (*Citrus x paradisi* MacFad) por la adición de una mezcla de quitina y quitosana obtenida a partir de residuos de camarón / *Effects on shelf life for grapefruit juice (Citrus x paradisi MacFad) of the addition of chitin-chitosan mixtures obtained from shrimp residues*. *Ambiens Techné et Scientia México*. 4(2):105-116.

Khanhahi, M.H., Sharifinia, M., Hajirezaee, S. 2020. Effects of different salinity levels on water quality, growth performance, and body composition of Pacific white shrimp

(*Litopenaeus vannamei* Boone, 1931) cultured in a zero water exchange heterotrophic system. *Annals of Animal Science*. 20(4):1471-1486.

Khor, E., Lim, L.Y. 2003. Implantable applications of chitin and chitosan. *Biomaterials*. 24(13):2339-2349.

Lafont, J.J., Durango, L.C., Araméndiz, H. 2014. Estudio químico del aceite obtenido a partir de siete variedades de soya (*Glycine max* L.). *Información Tecnológica*. 25(2):79-86.

Lakey-Beitia, J., Jagadeesh-Kumar, D., Hegde, M.L., Rao, K.S. 2019. Carotenoids as novel therapeutic molecules against neurodegenerative disorders: Chemistry and molecular docking analysis. *International Journal of Molecular Sciences*. 20(22):1-22.

López-Corres, G.R., Frías-Mendoza, A. 1976. *Monografía sobre extracción sólido-líquido*. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.

Luna-Rodríguez, A. 2003. *Extracción con lípidos con los pigmentos carotenoides del cefalotórax de camarón y su evaluación como ingrediente en dietas de larvicultivo de Litopenaeus vannamei*. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.

Luna-Rodríguez, A., Medina-Reyna, C.E., Pedroza-Islas, R., Durán-Domínguez-de-Bazúa, C. 2008. Oleous extraction of carotenoids from shrimp cephalothorax and its effect on a microencapsulated diet with Nauplii larvae. *J. Aq. Food Prod. Technol.* 17(4):367-386.

Manahan, S.E. 1997. *Introducción a la Química Ambiental*. Material didáctico para los cursos semestrales del Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México durante el lapso 1997-2006. Traducido del inglés por la Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa. A partir de 2007 aparece el libro de texto coeditado por la UNAM y Editorial Reverté. Ciudad de México, México y Barcelona, España.

Meléndez-Martínez, A.J., Vicario, I.M., Heredia, F.J. 2007. Pigmentos carotenoides: consideraciones estructurales y fisicoquímicas / *Carotenoid pigments: structural and physicochemical considerations*. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 57(2):109-117.

Melo, F., Ortega, D. 2016. *Diagnóstico de la cadena de valor Camarón en las regiones de Oaxaca*. (En línea) [Fecha de consulta 26 de diciembre de 2020]. Dirección electrónica: <http://www.coplade.oaxaca.gob.mx/wpcontent/uploads/2017/04/Perfiles/AnexosPerfiles/2.%20OCV%20CAMARON.pdf>

Mendoza-Pérez, S. 2014. *Obtención de pigmentos carotenoides a partir de desechos de jaiba (Callinectes sapidus)*. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.

Mendoza-Pérez, S., García-Gómez, R.S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2014. Astaxantina: Un poderoso antioxidante presente en los residuos de crustáceos con potencial nutracéutico / *Astaxanthin: A powerful antioxidant present in crustaceans residues with nutraceutic potential*. *Industria Alimentaria*. 37(3):32-41 (2015). ISSN 0187-7658

Mezzomo, N., Maestri, B., Dos Santos, R.L., Maraschin, M., Ferreira, S.R.S. 2011. Pink shrimp (*P. brasiliensis* and *P. paulensis*) residue: Influence of extraction method on carotenoid concentration. *Talanta*. 85(3):1383-1391.

Narayan, B., Velappan, S.P., Zituji, S.P., Manjabhatta, S.N., Gowda, L.R. 2010. Yield and chemical composition of fractions from fermented shrimp biowaste. *Waste Management & Research*. 28(1):64-70.

Nava-Arévalo, J.D., Enríquez-Estrada, R.A., García-Gómez, R.S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2016. Uso de recubrimientos naturales como complemento al tratamiento post-cosecha y ralentización de la madurez de guayabas (*Psidium guajava* L.). *Industria Alimentaria*. 38(3):62-72 (2016) ISSN 0187-7658.

Nirmal, N.P., Santivarangkna, C., Rajput, M.S., Benjakul, S. 2020. Trends in shrimp processing waste utilization: An industrial prospective. *Trends in Food Science and Technology*. 103:20-35.

Ortega-Granados, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2014. *Proceso de química verde para la obtención de materiales espumados a partir de residuos sólidos de animales artrópodos, y productos obtenidos con el mismo*. Solicitud de Registro de Patente: Diciembre 10, 2014. Facultad de Química, UNAM. IMPI. MX/a/2014/015119 folio MX/E/2014/088656. PA/a/2004/009517. Patente Núm. MX 371901. Otorgada el 06 de febrero de 2020. Ciudad de México, México.

Ortega-Granados, J.A. 2011. *Efecto del recubrimiento de fresas usando quitina-quitosana obtenida de cefalotórax y exoesqueleto de camarón en su vida de anaquel a temperatura ambiente (20±2 °C) y refrigeración (4 °C)*. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.

Ortega-Granados, J.A., Sarabia-Bañuelos, P., Flores-Ortega, R.A., García-Gómez, R.S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2014. Adición de un recubrimiento comestible extraído de residuos de la industria camaronícola a dos diferentes temperaturas (20±2, ~4°C) en frutos no climatéricos (*Fragaria x ananassa*) / Addition of edible coating of residues extracted from shrimp industry at two different temperatures (20±2, ~4°C) in non-climacteric fruits (*Fragaria x ananassa*). *Ambiens Techné et Scientia México*. 2(2):122-143.

Ortega-Granados, J.A., García-Gómez, R.S., Flores, R., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2015a. Caracterización mecánica de bioesponjas de residuos de crustáceos como opción al poliestireno expandido en empaques para alimentos. *Química Central*. 4(01): 13-25. <http://200.12.169.32/index.php/QUIMICA/article/view/107>.

Ortega-Granados, J.A., León-Salazar, M., Máximo-Jiménez, C., García-Gómez, R.S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2015b. Producción de polímeros verdes (bioesponjas) de

residuos sólidos de la industria camaronícola para aplicaciones en el área de empaques de alimentos / *Production of green polymers (bio-sponges) of shrimp solid wastes for applications in the food packing area. Ambiens Techné et Scientia México.* 3(1):17-26.

Pandel, R., Poljsak, B., Godic, A., Dahmane, R. 2013. Skin photo-aging and the role of antioxidants in its prevention. *ISRN Dermatology.* 930164:1–11.

Pedroza-Islas, R., Vernon-Carter, E.J., Durán-de-Bazúa, M.C., Chávez-Martínez, M.P. 1997. Las dietas balanceadas para larvas de crustáceos. Situación actual de los alimentos microencapsulados. *Industria Alimentaria.* 19(3):37-42. ISSN 0187-7658.

Prameela, K., Venkatesh, K., Immandi, S.B., Kasturi, A.P.K., Rama Krishna, C., Murali Mohan, C. 2017. Next generation nutraceutical from shrimp waste: The convergence of applications with extraction methods. *Food Chemistry.* 237:121-132.

Pu, J., Bechtel, P.J., Sathivel, S. 2010. Extraction of shrimp astaxanthin with flaxseed oil: Effects on lipid oxidation and astaxanthin degradation rates. *Biosystems Engineering.* 107(4):364-371.

Puga-López, D., Ponce-Palafox, J.T., Barba-Quintero, G., Torres-Herrera, M.R., Romero-Beltrán, E., Arredondo-Figueroa, J.L., García-Ulloa-Gómez, M. 2013. Physicochemical, proximate composition, microbiological and sensory analysis of farmed and wild harvested white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) tissues. *Current Research Journal of Biological Sciences.* 5(3):130-135.

Ramírez-Cruz, M.A. 2003. *Empleo de una enzima quitinolítica de Serratia marcescens para la obtención de carotenoproteínas a partir del cefalotórax de camarón.* Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.

Ramírez-Cruz, M.A., García-Gómez, R.S., Flores-Argüello, I., Gálvez-Mariscal, A., Durán-de-Bazúa, C. 2003. Empleo de una enzima quitinolítica de *Serratia marcescens* para la

obtención de carotenoproteínas a partir de cefalotórax de camarón / *Use of chitinolytic enzymes from Serratia marcescens to obtain carotenoproteins from shrimp cephalothorax.* *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*, **18**(1):32-39 (2003) ISSN 0186-6036

Ramírez-Hernández, J.Y. 2008. *Extracción y cuantificación de astaxantina de desechos de camarón fermentados*. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.

Razi-Parjikolaei, B., Bahij-El-Houri, R., Fretté, X. C., Christensen, K.V. 2015. Influence of green solvent extraction on carotenoid yield from shrimp (*Pandalus borealis*) processing waste. *Journal of Food Engineering*. **155**:22-28.

Reynoso-Amado, J.A., García-Gómez, R.S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2021. Estudios de la microbiota intestinal en ratas y ratones a los que se les suministraron edulcorantes / *Studies of the intestinal microbiota in rats and mice consuming caloric and hypocaloric sweeteners*. En Memorias del Séptimo Seminario Internacional de Expertos en el Tratamiento de Efluentes y Residuos Industriales en Honor a la Dra. Luisa Tan Molina / *Seventh International Seminar of Experts in the Treatment of Industrial Effluents and Residues in Honor to Mrs. Dr. Luisa Tan Molina*. Trabajo libre (cartel) T+L-CT-02. Pp. 291-298. ISSN en trámite / *ISSN in process* (INDAUTOR, México). Pub. RACAM. Ciudad de México, México.

Rivera-Velázquez, G. 2008. *La pesquería del camarón en el Sistema Lagunar Carretas-Pereyra: Determinación de su sustentabilidad*. Tesis de Doctorado en Ciencias Biológicas, Instituto de Biología, UNAM. Ciudad de México, México. <https://bidi.unam.mx/aleph-opac-logs/bitacoras.jsp?recurso=tesiunam&url=http%3A%2F%2F132.248.9.195%2Fptd2008%2Fnoviembre%2F0637107%2FIndex.html>

Romero-Olmos, D. 2019. *Desarrollo de un producto alimenticio empleando pigmentos caarotenoides (astaxantinas) obtenidas a partir de cefalotórax de camarón (Litopenaeus vannamei)*. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.

Routray, W., Dave, D., Cheema, S.K., Ramakrishnan, V.V., Pohling, J. 2019. Biorefinery approach and environment-friendly extraction for sustainable production of astaxanthin from marine wastes. *Critical Reviews in Biotechnology*. 39(4):469-488.

Roy, V.C., Getachew, A.T., Cho, Y.-J., Park, J.-S., Chun, B.-S. 2020. Recovery and bio-potentialities of astaxanthin-rich oil from shrimp (*Penaeus monodon*) waste and mackerel (*Scomberomous niphonius*) skin using concurrent supercritical CO₂ extraction. *The Journal of Supercritical Fluids*. 159:1-10.

Ruen-Ngam, D., Shotipruk, A., Pavasant, P. 2011. Comparison of extraction methods for recovery of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*. *Separation Science & Technology*. 46(1):64-70.

Ruiz-Luna, A., Meraz-Sánchez, R., Madrid-Vera, J. 2010. Patrones de distribución de la abundancia de camarón comercial en el noroeste de México, modelados con sistemas de información geográfica / *Abundance distribution patterns of commercial shrimp off northwestern Mexico modeled with geographic information systems*. *Ciencias Marinas*. 36(2):107-120.

Sachindra, N.M., Mahendrakar, N.S. 2005. Process optimization for extraction of carotenoids from shrimp waste with vegetable oils. *Bioresource Technology*. 96(10):1195-1200.

Sachindra, N., Bhaskar, N., Mahendrakar, N.S. 2006. Recovery of carotenoids from shrimp waste in organic solvents. *Waste Management*. 26(10):1092-1098.

Sarabia-Bañuelos, P., Mendoza-García, D.D., Luna-Rodríguez, A., Flores-Ortega, R.A., García-Gómez, R.S., Bernal-González, M., Solís-Fuentes, J.A., Pedroza-Islas, R., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2015. Aprovechamiento integral de crustáceos: Obtención de quitina y quitosana de su cefalotórax y exoesqueleto por métodos ecológicos y de carotenoproteínas para consumo humano / *Global use of crustaceans: Chitin and chitosan*

from its cephalothorax and exoskeleton using ecological methods and carotenoproteins for human consumption. *Revista-e VirtualPro*. No. 161, Junio. Química verde. 71 pags. Cali, Colombia. ISSN 1900-6241. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/aprovechamiento-integral-de-crustaceos-obtencion-de-quitina-y-quitosana-de-su-cefalotorax-y-exoesqueleto-por-metodos-ecologicos-y-de-carotenoproteinas-para-consumo-humano>.
<https://www.virtualpro.co/files-bv/20150601/20150601-042.pdf>

Schefflan, R. 2011. *Teach yourself the basics of Aspen plus*. Ed. Wiley. P. xiii. Nueva Jersey, Estados Unidos.

Segovia-Hernández, J.G., Gómez-Castro, F.I. 2017. Stochastic process optimization using Aspen Plus ®. Ed. CRC Press. P. 55-60. Florida, Estados Unidos.

SIAP. 2020. *Panorama Agroalimentario 2020*. (en línea) [Fecha de consulta: 03 de mayo de 2020]. Dirección electrónica. <https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2020/11/Atlas-Agroalimentario-2020.pdf>

Silva, A., Rodrigues, B., Silva, L., Rodrigues, A. 2018. Drying and extraction of astaxanthin from pink shrimp waste (*Farfantepenaeus subtilis*): The applicability of spouted beds. *Food Science and Technology*. 38(3):454-461.

Sinthusamran, S., Benjakul, S., Kijroongrojana, K., Prodpran, T., Agustini, T.W. 2018. Yield and chemical composition of lipids extracted from solid residues of protein hydrolysis of Pacific white shrimp cephalothorax using ultrasound-assisted extraction. *Food Bioscience*. 26:169-176.

Sinthusamran, S., Benjakul, S., Kijroongrojana, K., Prodpran, T., Kishimura, H. 2020. Protein hydrolysates from Pacific white shrimp cephalothorax manufactured with different processes: Compositions, characteristics and antioxidative activity. *Waste and Biomass Valorization*. 11(5):1657-1670.

Snodderly, D.M. 1995. Evidence for protection against age-related macular degeneration by carotenoids and antioxidant vitamins. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 62:1448S-1461S.

Tenorio-García, E. 2013. *Obtención, aplicación y evaluación de la vida de anaquel de un alimento adicionado con pigmentos carotenoides (astaxantina) obtenidos del cefalotórax de camarón*. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.

Tlelo-Bárcena, B. 2021. *Reaprovechamiento de crustáceos para la obtención de bio-materiales para la industria química y de proceso*. Tesis de Maestría en Ingeniería (Ingeniería Ambiental, Sustancias y residuos peligrosos). UNAM. Facultad de Química. Ciudad de México, México.

Tomás-Reyes, S., Valencia-Ávila, I., Flores-Ortega, R., García-Gómez, R.S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2015. Producción de una bioesponja de quitina de residuos de camarón utilizando un plastificante natural: Almidón de maíz / *Shrimp residues chitin biosponge production using a natural plasticizer: Maize starch*. *Ambiens Techné et Scientia México*. 3(1):40-62.

Török, B., Dransfield, T. 2018. *Green chemistry : an inclusive approach*. Ed. Elsevier. Pp 4-5. Boston, Estados Unidos.

Torres-Aguirre, L. 2007. *Extracción de caroteno-proteínas de cefalotórax de camarón con aceites comestibles*. Trabajo escrito vía cursos de educación continua. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.

Vargas-Cid, Y.E., García-Luna-Pérez, I.J., García-Gómez, R.S., Mendoza Pérez, S., Solís-Fuentes, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2019. Recubrimiento natural a partir de residuos de crustáceos y su aplicación en un alimento casero: Mermelada de un fruto climatérico (higo, *Ficus carica*) / *Natural coating from crustacean wastes and its application*

in a homemade food: Preserve of a climacteric fruit (figs, *Ficus carica*). **Industria Alimentaria**. 41(4):46-51b (2019). ISSN 0187-7658.

https://issuu.com/alfaeditorestecnicos/docs/industria_alimentaria_julio-agosto__c94049d7855bcc/4

Vázquez-Marcial, J.S. 2015. *Extracción de carotenoides (astaxantinas) a partir de exoesqueletos de jaibas (*Callinectes sapidus*) bajo diferentes condiciones de acidez empleando tecnologías más limpias*. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.

[https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/A7DIBJTT4JCN9VKI6M99LMQIYG6H2Q8QXHEVUU87J](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/A7DIBJTT4JCN9VKI6M99LMQIYG6H2Q8QXHEVUU87JD534I96AS-)

[33804?func=service&doc_library=TES01&doc_number=000735527&line_number=0001&func_code=WEB-FULL&service_type=MEDIA](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/A7DIBJTT4JCN9VKI6M99LMQIYG6H2Q8QXHEVUU87JD534I96AS-33804?func=service&doc_library=TES01&doc_number=000735527&line_number=0001&func_code=WEB-FULL&service_type=MEDIA)

[https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/A7DIBJTT4JCN9VKI6M99LMQIYG6H2Q8QXHEVUU87J](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/A7DIBJTT4JCN9VKI6M99LMQIYG6H2Q8QXHEVUU87JD534I96AS-)

[33804?func=service&doc_library=TES01&doc_number=000735527&line_number=0001&func_code=WEB-FULL&service_type=MEDIA](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/A7DIBJTT4JCN9VKI6M99LMQIYG6H2Q8QXHEVUU87JD534I96AS-33804?func=service&doc_library=TES01&doc_number=000735527&line_number=0001&func_code=WEB-FULL&service_type=MEDIA)

Velázquez-Solís, J.A., Sarabia-Bañuelos, P., García-Gómez, R.S., Solís-Fuentes, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.delC. 2019. Efectos de películas de quitina-quitosana obtenidas por medio de química verde sobre uvas de mesa / *Effect of chitin-chitosan films obtained by green chemistry on table grapes*. **Ambiens Techné et Scientia México**. 7(2):157-196 (2019).

Wang, L., Ye, L., Hua, Y., Zhang, G., Li, Y., Zhang, J., Shao, Q., He, J., Liu, M. 2019. Effects of dietary dl methionyl dl methionine (Met Met) on growth performance, body composition and haematological parameters of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) fed with plant protein-based diets. *Aquaculture Research*. 50(6):1718-1730.

Wang, Y., Liang, J. P., Duan, Y. F., Niu, J., Wang, J., Huang, Z., Lin, H. Z. 2017. Effects of dietary *Rhodiola rosea* on growth, body composition, and antioxidant capacity of white

shrimp *Litopenaeus vannamei* under normal conditions and combined stress of low-salinity and nitrite. *Aquaculture Nutrition*. 23(3):548-559.

Wang, Y., Zhang, A. C., Li, Y., Zhang, H., Wang, H., Feng F. 2020. Effects of dietary glycerol monolaurate on the growth performance, digestive enzymes, body composition and non-specific immune response of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture Reports*. 18:1-7.

Yan, N. y Chen, X. 2015. Don't waste seafood waste. *Nature*. 524(7564):155-157.

Zargar, V., Asghari, M., Dashti, A. 2015. A review on chitin and chitosan polymers: Structure, chemistry, solubility, derivatives, and applications. *Chem. Bio. Eng. Reviews*. 2(3):204-226.

Zhao T., Yan, X., Sun, L., Yang, T., Hu, X., He, Z., Liu, F. y Liu X. 2019. Research progress on extraction, biological activities and delivery systems of natural astaxanthin. *Trends in Food Science & Technology*. 91:354–361.