

EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DE UN MÉTODO DE CONCENTRACIÓN
DE ACEITE VIRGEN DE SACHA INCHI (*Plukenetia volubilis*) COMO FUENTE DE
OMEGA-3

LAURA CAMILA CAMARGO DUQUE
ANDRÉS FELIPE RODRÍGUEZ RONCANCIO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2020

EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DE UN MÉTODO DE CONCENTRACIÓN
DE ACEITE VIRGEN DE SACHA INCHI (*Plukenetia volubilis*) COMO FUENTE DE
OMEGA-3

LAURA CAMILA CAMARGO DUQUE
ANDRÉS FELIPE RODRÍGUEZ RONCANCIO

Proyecto integral de trabajo de grado para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
Juan Camilo Cely Garzón
Ingeniero Químico

Co asesor
María Eugenia Porras Cárdenas
Ingeniera Química

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

BOGOTÁ D.C, Agosto de 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa Ingeniería Química

Ing. IVAN RAMIREZ MARIN

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Este logro está dedicado a mis padres por creer en mis capacidades y darme la oportunidad de convertirme en profesional. Gracias por ser mi ejemplo a seguir, por sus consejos y palabras de aliento para impulsarme a alcanzar cada una de mis metas. A mi hermana y mi sobrino por su cariño y apoyo absoluto en el transcurso de este camino y a mi abuelita por ser la mejor guía de vida y acompañarme en cada momento importante.

Agradezco a mis amigos por todas las experiencias compartidas a lo largo de estos años y a mi compañero de trabajo de grado por su dedicación y apoyo para lograr este propósito.

Laura Camila Camargo Duque

DEDICATORIA

Al Todopoderoso que me dio la vida y me ilumino para poder culminar esta meta. A mis padres, hermanas y familiares que me apoyaron y guiaron en todo momento. A mi universidad, que me permitió ser su huésped y alumno en esta etapa tan importante de mi vida. A los profesores que me orientaron con sus valiosos conocimientos. A mi compañera de tesis por su apoyo, acompañamiento y esfuerzo para sacar adelante este proyecto.

Andrés Felipe Rodríguez Roncancio

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por permitirnos culminar esta etapa de nuestra vida y por darnos la oportunidad de dar un paso más hacia nuestras metas y aspiraciones tanto a nivel personal como a nivel profesional.

A nuestras familias por el apoyo incondicional en el transcurso de nuestra carrera profesional y por motivarnos a ser mejores personas cada día.

A nuestro director de trabajo de grado el ingeniero Juan Camilo Cely por su acompañamiento y orientación durante el desarrollo de este proyecto. Agradecemos su respaldo y confianza depositada en nosotros, reconociendo su calidad humana y profesional.

A la empresa BioRefinería S.A.S por abrirnos las puertas para la ejecución de este proyecto. De igual manera a Carlos Andrés Palacio Lopera y a la ingeniera María Eugenia Porras por su apoyo y confianza para llevar a cabo esta investigación y por los conocimientos y herramientas brindadas.

A la Universidad de América y a los docentes, por brindarnos los conocimientos y formación a lo largo de la carrera.

CONTENIDO

| | pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN | 23 |
| OBJETIVOS | 25 |
| 1. MARCO TEÓRICO | 26 |
| 1.1 GENERALIDADES | 26 |
| 1.1.1 BioRefinería S.A.S | 26 |
| 1.1.2 Aceites y grasas | 27 |
| 1.1.3 Concentración de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) | 28 |
| 1.2 EL SACHA INCHI (<i>Plukenetia volubilis</i>) | 31 |
| 1.2.1 Características de la planta | 31 |
| 1.2.2 Composición nutricional de la semilla | 33 |
| 1.2.3 Cultivo de Sacha inchi en Colombia | 34 |
| 1.2.4 Potencial del cultivo de sachá inchi y producción de aceite | 35 |
| 1.3 ACEITE DE SACHA INCHI | 36 |
| 1.3.1 Características fisicoquímicas del aceite de sachá inchi | 36 |
| 1.3.2 Métodos de extracción del aceite | 37 |
| 1.3.2.1 Extracción por prensado | 37 |
| 1.3.2.2 Extracción con disolventes | 38 |
| 1.3.2.3 Destilación por arrastre de vapor | 39 |
| 1.3.3 Aplicaciones del aceite de sachá inchi | 40 |
| 2. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE VIRGEN DE SACHA INCHI | 42 |
| 2.1 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA | 42 |
| 2.1.1 pH | 42 |
| 2.1.2 Densidad | 43 |
| 2.1.3 Índice de acidez | 44 |
| 2.1.4 Acidez | 46 |
| 2.1.5 Índice de refracción | 47 |
| 2.1.6 Índice de peróxidos | 48 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.1.7 | Índice de yodo | 51 |
| 2.1.8 | Índice de saponificación | 53 |
| 2.1.9 | Impurezas insolubles | 54 |
| 2.1.10 | Humedad y materiales volátiles | 56 |
| 2.1.11 | Perfil lipídico | 57 |
| 2.1.12 | Punto de humo | 58 |
| 2.1.13 | Punto de fusión | 58 |
| 2.2 | RESULTADOS PRUEBAS DE CARATERIZACIÓN | 59 |
| 2.3 | ANÁLISIS DE RESULTADOS PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN | 63 |
| 3. | SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CONCENTRACIÓN DE AGPI | 67 |
| 3.1 | MÉTODOS DE CONCENTRACIÓN DE AGPI | 67 |
| 3.1.1 | Métodos enzimáticos | 67 |
| 3.1.2 | Fraccionamiento por fluidos supercríticos | 69 |
| 3.1.3 | Cristalización fraccionada | 70 |
| 3.1.4 | Métodos cromatográficos | 76 |
| 3.1.5 | Formación de complejos con urea | 77 |
| 3.1.6 | Destilación molecular | 78 |
| 3.2 | DISEÑO DE LA MATRIZ DE DECISIÓN | 79 |
| 3.2.1 | Criterios de evaluación | 79 |
| 3.2.2 | Puntajes y niveles de los criterios de evaluación | 80 |
| 3.2.3 | Matriz de decisión | 81 |
| 4. | ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA CRISTALIZACIÓN FRACCIONADA | 83 |
| 4.1 | EQUIPOS UTILIZADOS EN LA CRISTALIZACIÓN | 83 |
| 4.1.1 | Tanques cristalizadores | 83 |
| 4.1.2 | Filtros | 84 |
| 4.2 | CONDICIONES DEL PROCESO DE CRISTALIZACIÓN | 86 |
| 4.2.1 | Cristalización del aceite de chía | 89 |
| 4.2.2 | Cristalización del aceite de pescado | 90 |
| 4.2.3 | Cristalización del aceite de linaza | 91 |

| | |
|--|-----|
| 4.3 PROPUESTA DE LAS CONDICIONES DE CRISTALIZACIÓN DEL ACEITE DE SACHA INCHI | 93 |
| 4.3.1 Variables | 93 |
| 4.3.2 Prototipo | 95 |
| 5. ANÁLISIS FINANCIERO A NIVEL PLANTA PILOTO | 102 |
| 5.1 COSTOS DE INVERSIÓN | 102 |
| 5.1.1 Costos de equipos | 102 |
| 5.2 COSTOS DE OPERACIÓN | 103 |
| 5.2.1 Costos de materia prima | 103 |
| 5.2.2 Costos energéticos | 104 |
| 5.2.3 Costos de mano de obra | 106 |
| 5.2.4 Costos de análisis | 108 |
| 5.3 COSTOS TOTALES | 109 |
| 5.4 ESTUDIO DEL VALOR PRESENTE NETO (VPN) | 109 |
| 6. CONCLUSIONES | 112 |
| 7. RECOMENDACIONES | 114 |
| BIBLIOGRAFÍA | 116 |
| ANEXOS | 128 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Valores de referencia de la composición nutricional de la semilla de sachá inchi por 100 gramos de semilla (% m/m). | 34 |
| Tabla 2. Caracterización del sachá inchi y otras semillas oleaginosas. | 37 |
| Tabla 3. Masa de porción de ensayo y concentración de solución de álcali según el porcentaje de acidez esperado. | 45 |
| Tabla 4. Masa de porción de ensayo y volumen de solvente según el índice de yodo esperado. | 51 |
| Tabla 5. Resultados pruebas de caracterización fisicoquímica del aceite. | 59 |
| Tabla 6. Comparación de resultados experimentales con las características de calidad de aceites vegetales según la Resolución 2154 de 2012 de Bogotá. | 60 |
| Tabla 7. Comparación de resultados experimentales con los requisitos del aceite de sachá inchi según la NTP 151.400:2014. | 61 |
| Tabla 8. Perfil de ácidos grasos del aceite de sachá inchi. | 62 |
| Tabla 9. Valores de otras pruebas de caracterización del aceite de sachá inchi. | 63 |
| Tabla 10. Optimización de respuesta múltiple para el contenido de EPA y DHA. | 69 |
| Tabla 11. Puntaje establecido para cada método de concentración propuesto. | 82 |
| Tabla 12. Matriz de decisión para la selección del método de concentración de omega-3. | 82 |
| Tabla 13. Comparación del perfil de ácidos grasos del aceite de chíá, pescado y linaza versus aceite de sachá inchi. | 88 |
| Tabla 14. Perfil de ácidos grasos de la fracción líquida y la fracción sólida del aceite de chíá. | 90 |
| Tabla 15. Perfil de ácidos grasos del aceite de pescado hoki y de sus fracciones líquidas obtenidas por cristalización fraccionada convencional (CF). | 91 |
| Tabla 16. Punto de fusión de los ácidos grasos que contiene el aceite de linaza. | 92 |
| Tabla 17. Resultados obtenidos del perfil de ácidos grasos del aceite de linaza a diferentes temperaturas de cristalización. | 93 |
| Tabla 18. Estimación de las variables de la cristalización fraccionada del aceite de sachá inchi. | 94 |
| Tabla 19. Punto de fusión de los ácidos grasos saturados presentes en el aceite de sachá inchi. | 94 |
| Tabla 20. Costos de adquisición de equipos. | 103 |
| Tabla 21. Costos mensuales de materia prima. | 104 |
| Tabla 22. Especificaciones técnicas y tiempo de trabajo de los equipos. | 104 |
| Tabla 23. Costos mensuales asociados al consumo energético de los equipos. | 106 |
| Tabla 24. Costos de mano de obra. | 108 |
| Tabla 25. Costos de análisis fisicoquímicos y microbiológicos semanal. | 108 |
| Tabla 26. Costos totales mensuales de la planta piloto. | 109 |

LISTA DE DIAGRAMAS

| | pág. |
|---|------|
| Diagrama 1. Extracción por prensado del aceite de sachá inchi (SI). | 38 |
| Diagrama 2. Extracción de aceites con disolventes. | 39 |
| Diagrama 3. Extracción por destilación por arrastre de vapor. | 39 |
| Diagrama 4. Procedimiento para la determinación del pH del aceite según NTC 3651:2012. | 42 |
| Diagrama 5. Procedimiento para la determinación de la densidad del aceite según NTC 336:2016. | 43 |
| Diagrama 6. Procedimiento para la determinación del índice de acidez y de la acidez del aceite según norma NTC 218:20 | 45 |
| Diagrama 7. Procedimiento para la determinación del índice de refracción del aceite según NTC 289:2002. | 47 |
| Diagrama 8. Procedimiento para la determinación del factor de la solución de tiosulfato de sodio 0,01N según NTC 236:2011. | 48 |
| Diagrama 9. Procedimiento para la determinación del índice de peróxidos del aceite según NTC 236:2011. | 50 |
| Diagrama 10. Procedimiento para la determinación del índice de yodo del aceite según NTC 283:2012. | 52 |
| Diagrama 11. Procedimiento para la determinación del índice de saponificación del aceite según NTC 335:2019. | 53 |
| Diagrama 12. Procedimiento para la determinación del contenido de impurezas insolubles del aceite según NTC 240:2011. | 55 |
| Diagrama 13. Procedimiento para la determinación del contenido de humedad y materia volátil del aceite según NTC 287:20 | 57 |
| Diagrama 14. Ruta de elaboración de la matriz de decisión. | 67 |

LISTA DE ECUACIONES

| | pág. |
|---|------|
| Ecuación 1. Cálculo de la densidad en aceites y grasas según NTC 336:2016. | 44 |
| Ecuación 2. Cálculo del índice de acidez para aceites y grasas según NTC 218:2011. | 46 |
| Ecuación 3. Cálculo de la acidez en aceites y grasas según NTC 218:2011. | 46 |
| Ecuación 4. Cálculo del factor de la solución normalizada de tiosulfato según NTC 236:2011. | 49 |
| Ecuación 5. Cálculo del índice de peróxidos en aceites y grasas según NTC 236:2011. | 50 |
| Ecuación 6. Cálculo del índice de yodo en aceites y grasas según NTC 283:2012. | 52 |
| Ecuación 7. Cálculo del índice de saponificación en aceites y grasas según NTC 335:2019. | 54 |
| Ecuación 8. Cálculo del contenido de impurezas insolubles en aceites y grasas según NTC 240:2011. | 55 |
| Ecuación 9. Cálculo del contenido de humedad y materia volátil en aceites y grasas según NTC 287:2018. | 57 |
| Ecuación 10. Costo energético diario del equipo en \$COP | 105 |
| Ecuación 11. Costo mensual energético del equipo en \$COP | 105 |
| Ecuación 12. Fórmula valor presente neto (VPN). | 110 |

LISTA DE IMÁGENES

| | pág. |
|--|------|
| Imagen 1. Clasificación de los lípidos. | 27 |
| Imagen 2. Reacción de formación de triglicéridos. | 28 |
| Imagen 3. Ácidos grasos poliinsaturados omega-3 y omega-6. | 29 |
| Imagen 4. Distribución de los cultivos de sachá inchi en América. | 32 |
| Imagen 5. Planta de sachá inchi (SI). | 33 |
| Imagen 6. Semillas y almendras del sachá inchi. | 33 |
| Imagen 7. Reacción de hidrólisis de las grasas y aceites. | 56 |
| Imagen 8. Proyecciones espaciales de las formas cristalinas α , β' y β . | 75 |
| Imagen 9. Tanques cristalizadores convencionales con sistema de agitación. | 84 |
| Imagen 10. Filtro de tambor rotativo de vacío. | 85 |
| Imagen 11. Filtro prensa de membranas. | 86 |
| Imagen 12. Prototipo del sistema de cristalización del aceite de sachá inchi a nivel laboratorio. | 95 |
| Imagen 13. Conexión del motor paso a paso al Arduino UNO. | 100 |
| Imagen 14. Conexión del sensor de temperatura sumergible al Arduino UNO. | 100 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | pág. |
|--|------|
| Gráfica 1. Participación porcentual de área agrícola dedicada a cultivos agroindustriales en área rural dispersa censada. | 35 |
| Gráfica 2. Exportaciones colombianas de "otros aceites" y principales destinos. | 36 |
| Gráfica 3. Diagrama de solubilidad y sobresaturación de Miers. | 72 |
| Gráfica 4. Diagrama de fases de una mezcla de triglicéridos A y B. | 73 |

LISTA DE CUADROS

| | pág. |
|---|------|
| Cuadro 1. Cifras del Ecosistema SumaSach'a® 2019. | 26 |
| Cuadro 2. Métodos de concentración de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI). | 30 |
| Cuadro 3. Abreviaciones de los métodos a evaluar en la matriz de decisión. | 79 |
| Cuadro 4. Puntaje asignando a los criterios de evaluación en la matriz de decisión. | 80 |
| Cuadro 5. Porcentaje de ponderación para los criterios de evaluación. | 81 |
| Cuadro 6. Equipos del prototipo del sistema de cristalización del aceite de sachá inchi a nivel laboratorio. | 96 |
| Cuadro 7. Elementos del sistema de agitación y medición de variables del prototipo. | 99 |
| Cuadro 8. Funciones del trabajador. | 107 |

LISTA DE ANEXOS

| | pág. |
|--|------|
| Anexo A. Cotización filtro prensa. | 129 |
| Anexo B. Flujo de caja del proyecto, valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno (TIR). | 130 |

LISTA DE ABREVIATURAS

- AA: Ácido graso araquidónico.
- AG: Ácidos grasos.
- AGI: Ácidos grasos insaturados.
- AGM: Ácidos grasos monoinsaturados.
- AGPI: Ácidos grasos poliinsaturados.
- AGS: Ácidos grasos saturados.
- CF: Cristalización fraccionada.
- CFSC: Cromatografía de fluidos supercríticos.
- CG: Cromatografía de gases.
- CL: Cromatografía líquida.
- CME: Concentración por métodos enzimáticos.
- DHA: Ácido docosahexaenoico.
- DM: Destilación molecular.
- DSC: Calorimetría diferencial de barrido.
- EPA: Ácido eicosapentaenoico.
- FCU: Formación de complejos con urea.
- FFSC: Fraccionamiento por fluidos supercríticos.
- FMC: Fraccionamiento por métodos cromatográficos.
- GLA: Ácido graso gamma-linolénico.
- SI: Sacha inchi.
- TIR: Tasa interna de retorno.
- VPN: Valor presente neto.

GLOSARIO

ACEITE VEGETAL: compuesto orgánico obtenido a partir de a partir de semillas u otras partes de las plantas, que se caracteriza por ser líquido a temperatura ambiente.¹

ACEITE VIRGEN: aceite obtenido por procedimientos mecánicos y/o por aplicación únicamente de calor, sin alterar su naturaleza.²

ÁCIDOS GRASOS: son biomoléculas constituidas por lípidos que se forman a partir de una cadena de hidrógeno y carbono lineal.

ÁCIDOS GRASOS INSATURADOS: conjunto de ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados.

ÁCIDOS GRASOS MONOINSATURADOS: son aquellos que en su cadena hidrocarbonada solo tienen un doble enlace.

ÁCIDOS GRASOS SATURADOS: son aquellos que en su cadena hidrocarbonada solo tienen enlaces sencillos entre los átomos de carbono adyacentes.

ÁCIDOS GRASOS POLIINSATURADOS: son aquellos que en su cadena hidrocarbonada tienen más de un doble enlace.

CONCENTRACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS: proceso por el cual se somete un aceite o grasa a un método de separación para obtener fracciones sólidas o líquidas con mayor proporción del tipo de ácido graso de interés.

COP: símbolo del peso colombiano.

CRISTALIZACIÓN FRACCIONADA: proceso de separación termo-mecánico de los ácidos grasos de alto y bajo punto de fusión por enfriamiento gradual seguido de una filtración.

GRASA VEGETAL: aceite vegetal sólido a temperatura ambiente.

¹ECURED. Aceite vegetal. [Sitio web]. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Aceite_vegetal

² MINISTERIO DE SALUD. Resolución 2154 (08, agosto, 2012). Por la cual se establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir los aceites y grasas de origen vegetal o animal que se procesen, envasen, almacenen, transporten, exporten, importen y/o comercialicen en el país, destinados para el consumo humano y se dictan otras disposiciones. [En línea]. Bogotá D.C.: El Ministerio de Salud y Protección. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: http://normograma.invima.gov.co/docs/resolucion_minsaludps_2154_2012.htm?q=2154

PUNTO DE FUSIÓN: temperatura a la cual una sustancia pasa del estado sólido al estado líquido.

TRIGLICÉRIDO: es la unión de tres ácidos grasos a una molécula de glicerol. Son un tipo de lípidos que se forman en el intestino y circulan por la sangre, procedentes sobre todo de las grasas que contienen los alimentos que consumimos, pero que también puede producir el hígado.³

³ SALABERT, Eva. Triglicéridos, por qué suben y alimentos para bajar sus niveles. [En línea]. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.webconsultas.com/curiosidades/trigliceridos-por-que-suben-y-alimentos-para-bajar-susniveles#:~:text=Los%20triglic%C3%A9ridos%20son%20un%20tipo,tambi%C3%A9n%20puede%20producir%20el%20h%C3%ADgado.>

RESUMEN

En este proyecto se realiza la evaluación técnico-financiera de la selección de un método de concentración de aceite virgen de sachá inchi (*Plukenetia volubilis*) como fuente de omega-3. Inicialmente se determinaron a nivel laboratorio las características fisicoquímicas del aceite virgen de sachá inchi proporcionado por la empresa BioRefinería S.A.S. Los valores obtenidos se encontraron dentro de los parámetros establecidos de acuerdo con la Resolución 2154 de 2012 dada en Bogotá, que establece las características de calidad de los aceites vegetales. Así mismo, se tuvo en cuenta la Norma Técnica Peruana NTP 151.400:2014 que especifica los requisitos que debe cumplir el aceite de sachá inchi, ya que en Colombia no existe una norma específica para este aceite. Los resultados indicaron que el aceite es de alta calidad debido a su bajo contenido de ácidos grasos libres al igual que un bajo porcentaje de impurezas insolubles. De igual manera se determinó el alto grado de insaturación del aceite debido a la presencia de ácidos grasos insaturados de cadena larga correspondientes al omega-3 y omega-6.

Se seleccionó el método de cristalización fraccionada para la concentración de los ácidos grasos omega-3 del aceite de sachá inchi por medio de una matriz de decisión. En la matriz se tuvieron en cuenta diferentes criterios de evaluación donde la cristalización fraccionada se destacó por ser un proceso no invasivo químicamente, lo cual permite conservar las propiedades originales del aceite virgen y por ser un proceso fácilmente escalable.

Adicionalmente, con base en referentes bibliográficos se establecieron las especificaciones técnicas de la cristalización fraccionada donde se estimaron las variables más importantes del proceso las cuales corresponden a la temperatura de pretratamiento de la materia prima, temperatura de operación, velocidad de agitación y tiempo final de cristalización para la concentración de omega-3 del aceite de sachá inchi, obteniendo unos rangos estimados de 60-70°C para la temperatura de pretratamiento, una temperatura de operación entre -2 y 3°C, una velocidad de agitación entre 5 y 10 rpm y un tiempo final de cristalización entre 8 y 12 horas.

Por último, se realizó un análisis financiero del método de cristalización fraccionada a nivel planta piloto para evaluar la viabilidad del método, en donde se establecieron los costos de inversión y de operación requeridos para la puesta en marcha del proceso y por medio del modelo financiero de valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR), se determinó la viabilidad del proyecto el cual tendrá beneficios a largo plazo.

Palabras clave: sachá inchi, aceite, ácidos grasos poliinsaturados, omega-3, concentración, cristalización fraccionada.

INTRODUCCIÓN

Instituciones como la Red colombiana de pacientes con Hipercolesterolemia (RedCol HF), afirman que el 47,6% de los infartos en Colombia se producen por colesterol elevado⁴, haciendo un llamado a la población a consumir alimentos más saludables. Una de las estrategias para reducir estos indicadores es incentivar el consumo de omega-3 en la población, dado que son ácidos grasos esenciales que contribuyen con la disminución de colesterol en la sangre, teniendo como valor agregado un buen desarrollo en las facultades neurocognitivas por parte del ácido docosahexaenoico (DHA) y el ácido eicosapentaenoico (EPA), principales ácidos grasos del omega-3.⁵

Bajo esta perspectiva, una posible alternativa es hacer uso del aceite procedente de la planta de sacha inchi ya que tiene un alto contenido de omega-3, 6 y 9 correspondientes en promedio al 47,6%, 35,3% y 8,45% respectivamente, además de tener elevado contenido antioxidantes y vitaminas, entre otros componentes nutricionales benéficos para la salud.⁶ Esta planta amazónica durante los últimos años ha cobrado gran interés, abriendo varios campos de investigación y bioprospección debido a su alto contenido de ácidos grasos insaturados y tener el contenido de ácidos grasos saturados más bajo con respecto a otras oleaginosas utilizadas en la producción de aceite.⁷

Por lo anterior, el presente estudio busca mediante la investigación, evaluar técnica y financieramente un método de concentración de aceite virgen de sacha inchi como fuente de omega-3. Para esto, se emplean diferentes Normas Técnicas Colombianas para realizar la caracterización fisicoquímica de la materia prima a nivel laboratorio y poder comparar los resultados con la normatividad vigente. Posteriormente, por medio una metodología de tipo teórica se realiza una recopilación de datos obtenidos de diferentes fuentes de información donde se describen los métodos de concentración de ácidos grasos poliinsaturados presentes en aceites vegetales o de origen animal como el pescado, los cuales pueden tener aplicación en el sector alimentario con el desarrollo de alimentos funcionales. Con esta información, por medio de una matriz de decisión se

⁴ OCHOA, Andrea. En Colombia gran parte de los infartos son producidos por tener el colesterol alto. En: Periódico El Pulso, Medellín. [En línea]. Marzo, 2018. sec. Generales. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <http://www.periodicoelpulso.com/ediciones-antiores-2018/html/1803mar/general/general-08.htm>

⁵ WAITZBERG, Dan., GARLA, Priscila. Contribución de los Ácidos Grasos Omega-3 para la Memoria y la Función Cognitiva. En: Nutrición Hospitalaria. 2014, Vol.30. No.3. p. 468. ISSN 0212-1611

⁶ HURTADO, Zully. Análisis composicional de la torta y aceite de semillas de sacha inchi (*Plukenetia volubilis*) cultivada en Colombia. [En línea]. Trabajo de investigación Magister en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Colombia, Palmira: 2013. p.22. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/12689/1/7609501.2013.pdf>

⁷ *Ibíd.*, p.26.

selecciona el método de concentración de omega-3 del aceite de sachá inchi y se identifican las variables del proceso más influyentes como: temperatura de pretratamiento de la materia prima, temperatura de operación, velocidad de agitación y tiempo final de cristalización, según diferentes artículos enfocados en la concentración de omega-3 en aceites. Finalmente se realiza el análisis financiero del método seleccionado teniendo en cuenta los costos asociados al proceso a nivel planta piloto, con el objetivo de evaluar la viabilidad del método usando el modelo financiero de valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar técnica y financieramente un método de concentración de aceite virgen de sachá inchi (*Plukenetia volubilis*) como fuente de omega-3.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las propiedades fisicoquímicas de la materia prima.
- Seleccionar un método de concentración de omega-3 para el aceite de sachá inchi por medio de una matriz de decisión.
- Establecer las especificaciones técnicas del método seleccionado.
- Realizar un análisis financiero del método de concentración a nivel planta piloto.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 GENERALIDADES

1.1.1 BioRefinería S.A.S. El auge de los “otros aceites” provenientes de materias primas no convencionales como el sacha inchi, ha permitido la elaboración de productos más competitivos en el mercado que se ajusten a la tendencia de consumo de las personas hacia productos más saludables. Un ejemplo de esto es SumaSach´a®, un Ecosistema Empresarial Agroindustrial Inclusivo en Red ubicado Colombia que por medio de la biodiversidad latinoamericana busca la oportunidad de satisfacer el mercado creciente de productos para el bienestar, la salud y la belleza.

El ecosistema SumaSach´a® tiene como objetivo generar productos de valor agregado desde Unidades Empresariales Independientes ubicadas en el campo, incentivando la incorporación de agricultores quienes además de ser proveedores de materia prima, se organizan en dichas Unidades Empresariales, convirtiéndose en socios industriales del negocio, permitiéndole al ecosistema convertirse en un motor del desarrollo regional a partir de productos agrícolas iniciando con sacha inchi. En el cuadro 1 se pueden observar las dos empresas que articulan el Ecosistema SumaSach´a® y sus respectivas cifras para el año 2019. Una de ellas es la Cooperativa SachaColombia que permite que los agricultores pertenezcan a un modelo de economía solidaria a través del cual se convierten en socios dueños de empresas transformadoras, mientras que la empresa BioRefinería S.A.S se encarga de la incubación de las Unidades Empresariales Agroindustriales Independientes (UEAI) que evolucionan a empresas S.A.S y de la comercialización de todos los productos desarrollados por dichas Unidades y la Cooperativa SachaColombia.

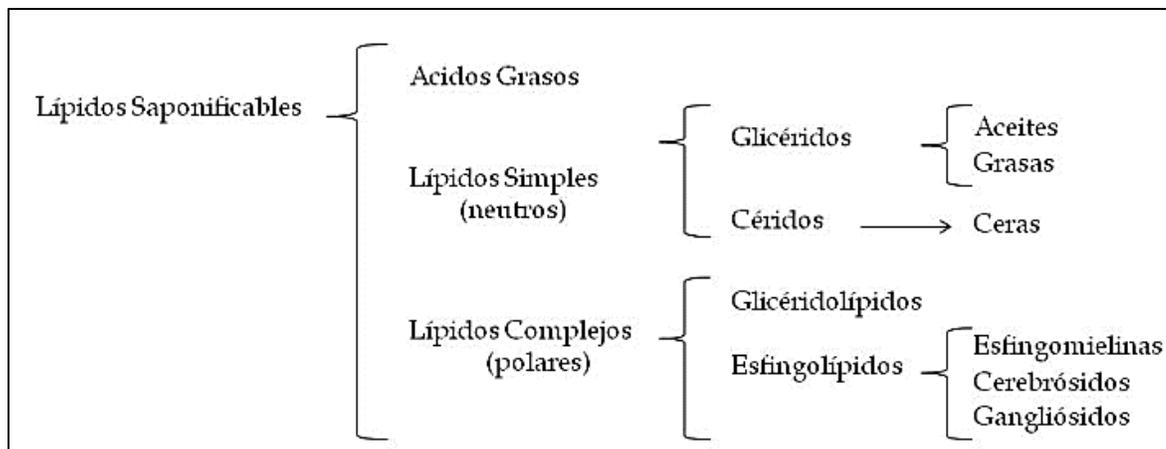
Cuadro 1. Cifras del Ecosistema SumaSach´a® 2019.

| SachaColombia | BioRefinería SAS |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">• 1.008 Agricultores• 191 Hectáreas Sembradas• 24 Hectáreas en Proceso de certificación Orgánica.• 19 Emprendimientos Cooperativos en 14 Departamentos• 13 Cooperativas Creadas. | <ul style="list-style-type: none">• 81 UEAI en proceso de incubación• 11 UEAI Creadas (SAS)• 29 Especies de la diversidad identificadas con alto potencial de Mercado.• 3 Productos desarrollados• 3 UEAI Operando y Facturando |

Fuente: SUMASACH´A. Presentación corporativa 2019. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.sumasacha.com/>

1.1.2 Aceites y grasas. Las grasas y aceites son los lípidos más abundantes en la naturaleza⁸, y como se puede evidenciar en la imagen 1 corresponden a un tipo de lípido saponificable, es decir, lípidos simples compuestos por glicéridos que son los constituyentes principales de las células. Se les denomina grasa o aceite según su estado sólido o líquido a temperatura ambiente y su importancia radica en que son la principal fuente de energía de la alimentación ya que aportan ácidos grasos esenciales necesarios para el correcto funcionamiento celular.⁹

Imagen 1. Clasificación de los lípidos.



Fuente: IIDENUT. Clasificación actualizada de los lípidos. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.iidenut.org/instituto/2018/10/16/clasificacion-actualizada-de-los-lipidos/>

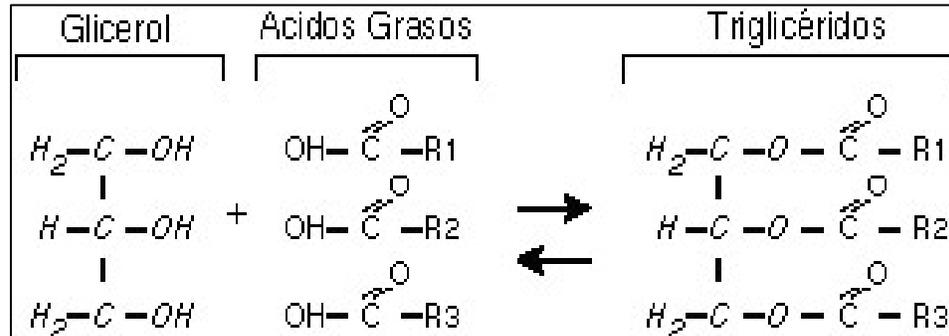
Las moléculas de grasa son mezclas de triglicéridos, que desde un punto de vista bioquímico es la unión de tres ácidos grasos a un esqueleto de glicerol como se muestra en la imagen 2. Estos ácidos grasos son largas cadenas de carbohidratos unidos a un grupo carboxilo, que pueden tener desde 4 a 36 carbonos, mientras que el glicerol es una molécula pequeña con tres grupos hidroxilo. La reacción entre el glicerol y el grupo carboxilo del ácido graso, corresponde a una síntesis por deshidratación donde las cadenas de ácidos grasos pueden ser iguales o diferentes, por lo que se distinguen en su longitud o en la cantidad de enlaces dobles que contengan.¹⁰

⁸ GONZÁLES, Jesús. Unidad 7: Lípidos. [En línea]. Instituto Tecnológico de la Paz. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.coursehero.com/sitemap/schools/66019-Technological-Institute-of-La-Paz/departments/739487-BIOCHEMISTRY/>

⁹ SOCIEDAD ARGENTINA DE NUTRICIÓN. Grasas y aceites. [En línea]. p.2. [Consultado 10, abril 2020]. Disponible en: <http://www.sanutricion.org.ar/files/upload/files/Grasas-y-Aceites.pdf>

¹⁰KHAN ACADEMY. Lípidos. [Sitio web]. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://es.khanacademy.org/science/biology/macromolecules/lipids/a/lipids>

Imagen 2. Reacción de formación de triglicéridos.



Fuente: UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA. Lección 5. Digestión, absorción y metabolismo de los lípidos en monogástricos y rumiantes. Lípidos. [En línea]. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.uco.es/zootecniaygestion/menu.php?tema=154>

Los ácidos grasos pueden clasificarse en 4 tipos:

- **Saturados:** predominan en los alimentos de origen animal, y en algunos de origen vegetal como el aceite de coco y de palma. Son sólidos a temperatura ambiente, y tienen una gran estabilidad ya que solo tienen enlaces sencillos entre átomos de carbono adyacentes.¹¹
- **Monoinsaturados:** son aquellos que tienen un doble enlace en la molécula. El más conocido es el ácido oleico de la serie omega-9, constituyente del aceite de oliva.¹²
- **Poliinsaturados:** corresponden a los ácidos grasos esenciales, como omega-3 y omega-6 ya que el organismo no los puede sintetizar. Son aquellos que tienen más de un doble enlace en la molécula, lo que los hace líquidos a temperatura ambiente.¹³ Están presentes en pescados de agua fría y en vegetales como el sacha inchi, el lino, la colza y la nuez.¹⁴
- **Trans:** son aquellos que se forman como resultado de una modificación industrial de aceites vegetales buscando saturarlos para hacerlos más resistentes a la oxidación. Se encuentran en margarinas sólidas y en otros productos para pastelería y repostería.¹⁵

1.1.3 Concentración de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI). Como se mencionó en la sección anterior, los ácidos grasos poliinsaturados corresponden a dos series: los omega-3 y los omega-6 según la posición del primer doble enlace

¹¹ CARBAJAL, Ángeles. Manual de nutrición y dietética. [En línea]. Universidad Complutense de Madrid. Madrid: 2013. p.1. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://eprints.ucm.es/22755/1/Manual-nutricion-dietetica-CARBAJAL.pdf/>

¹² SOCIEDAD ARGENTINA DE NUTRICIÓN. Grasas y aceites. Op. Cit., p.3.

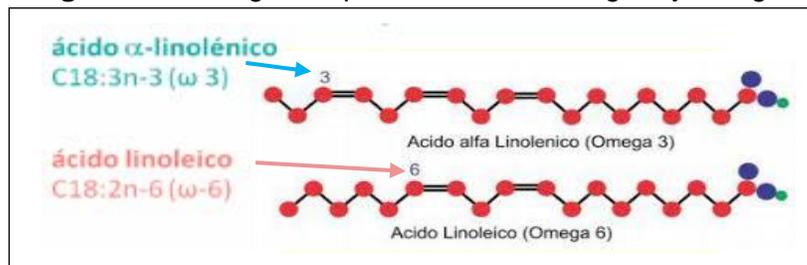
¹³ CARBAJAL, Ángeles. Op. Cit., p.2.

¹⁴ GRALCO S.A. Omega-3. [Sitio web]. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: https://www.gralco.com.co/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=155

¹⁵ SOCIEDAD ARGENTINA DE NUTRICIÓN. Grasas y aceites. Op. Cit., p.3.

de la cadena carbonada, como se puede observar en la imagen 3. Sus ácidos grasos precursores son el ácido alfa-linolénico para la serie omega-3 y el ácido linoleico para la serie omega-6. Estos ácidos grasos son considerados esenciales debido a que solo pueden ser adquiridos por la alimentación y no se pueden sintetizar de manera endógena.¹⁶

Imagen 3. Ácidos grasos poliinsaturados omega-3 y omega-6.



Fuente: HOSPITAL SANT JOAN DE DÉU. Ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs). [Sitio web]. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://metabolicas.sjdhospitalbarcelona.org/noticia/acidos-grasos-poliinsaturados-pufas>

Dentro de la serie de los ácidos grasos omega-3, se encuentran el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el ácido docosahexaenoico (DHA) los cuales poseen funciones importantes en el organismo. El EPA se encarga de la funcionalidad cerebral en cuanto a su desarrollo óptimo y riesgo neuronal y también de la vista, mientras que el DHA es un ácido graso que forma parte de la estructura celular y hace parte del desarrollo visual a edades tempranas.¹⁷

A la serie de ácidos grasos omega-6, pertenecen los ácidos grasos gamma-linolénico (GLA) y el araquidónico (AA). El GLA es un componente estructural de membrana, mientras que el AA es un ácido graso básico para la síntesis de ciertas prostaglandinas.¹⁸

Además de las funciones mencionadas que desempeñan los ácidos grasos poliinsaturados en el cuerpo humano, la ingesta de omega-3 ayuda a reducir los triglicéridos, el colesterol en la sangre y el riesgo de arritmia, mientras que el omega-6 se relaciona con el control de azúcar en la sangre y la reducción del riesgo de padecer diabetes.¹⁹

¹⁶ AIRES, Davis., CAPDEVILA, Nuria., SEGUNDO, María. Ácidos grasos esenciales, su influencia en las diferentes etapas de la vida. En: OFFARM. Revista de la oficina de farmacia. 2005. Vol.24. No.4. p.1.

¹⁷ *Ibíd.*, p.2.

¹⁸ *Ibíd.*, p.2.

¹⁹ MEDLINEPLUS. Realidades acerca de las grasas poliinsaturadas. [Sitio web]. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/patientinstructions/000747.htm>

Por lo anterior, ha sido de gran interés la concentración de ácidos grasos poliinsaturados tanto para la industria alimentaria la cual enriquece muchos alimentos y bebidas con omega-3 como: huevos, leche y margarinas²⁰, como para el sector de la salud debido a los beneficios mencionados asociados al consumo.

Actualmente, existen distintos métodos para la concentración de los ácidos grasos poliinsaturados los cuales se resumen en el cuadro 2, y serán detallados en el capítulo 3 de la presente investigación. La fuente de los AGPI generalmente corresponde a pescados como el salmón, la sardina y el atún y frutos secos y semillas como la chía, el sacha inchi y las nueces.²¹

Cuadro 2. Métodos de concentración de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI).

| Método | Principio físico – químico |
|---|--|
| Concentración por métodos enzimáticos ²² | <ul style="list-style-type: none"> • Se basa en la selectividad de algunas enzimas lipasas por determinados ácidos grasos o posiciones en las moléculas de triacil-gliceroles. • Las enzimas catalizan reacciones de hidrólisis, alcoholisis o transesterificación de triacilgliceroles. |
| Fraccionamiento por fluidos supercríticos ²³ | <ul style="list-style-type: none"> • Es un tipo de cromatografía en la que la fase móvil es un fluido supercrítico, generalmente CO₂. • Las propiedades del disolvente de los fluidos supercríticos permiten la disolución selectiva de los analitos al variar la densidad del fluido supercrítico, determinada por su presión y temperatura. |
| Cristalización fraccionada ²⁴ | <ul style="list-style-type: none"> • También conocido como hibernación es un proceso que involucra la cristalización parcial del aceite mediante enfriamiento controlado, seguido de filtración. • Su principal objetivo es separar ácidos grasos saturados de los insaturados por punto de fusión. |

²⁰ SERVICIO NACIONAL DEL CONSUMIDOR. Análisis de Productos Alimenticios Enriquecidos con Ácidos Grasos Omega-3. [Sitio web]. Chile: 2004. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.sernac.cl/portal/619/w3-article-6077.html>

²¹ GÓMEZ, Rocío. 10 alimentos con Omega-3 esenciales para nuestra salud. En: Sanitas. España: 2018. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://muysaludable.sanitas.es/nutricion/10-alimentos-omega-3-esenciales-nuestra-salud/>

²² BONILLA, Jeimmy., HOYOS, José. Métodos de extracción, refinación y concentración de aceite de pescado como fuente de ácido grasos omega-3. En: Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria. 2018. Vol.19. No.3. p. 637. ISSN: 0122-8706

²³ VAZQUEZ DE FRUTOS, Luis. Extracción con fluidos supercríticos y síntesis enzimática para la obtención de lípidos funcionales. [En línea]. Tesis Doctoral. Universidad autónoma de Madrid, España: 2008. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/1830/5441_vazquez_frutos_luis.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

²⁴ *Ibíd.*, p.633.

Cuadro 2. (Continuación)

| Método | Principio físico – químico |
|---|--|
| Fraccionamiento por métodos cromatográficos ²⁵ | <ul style="list-style-type: none">• Métodos físicos de separación basados en la distribución de los componentes de una mezcla entre dos fases inmiscibles, una estacionaria y otra móvil.• Estas técnicas se clasifican de acuerdo con la naturaleza de la fase móvil. Así, hablamos de diferentes tipos de cromatografía como: CG, CL y CFSC. |
| Formación de complejos con urea ²⁶ | <ul style="list-style-type: none">• Permite el fraccionamiento de mezclas de AG mediante la formación de complejos entre la urea y cadenas lineales de más de 6 átomos de carbono.• La estabilidad de estos aductos aumenta con la linealidad de la molécula por lo que formará aductos principalmente con AGS, más lineales, seguidos de AGM y AGPI de menor a mayor número de insaturaciones. |
| Destilación molecular ²⁷ | <ul style="list-style-type: none">• Proceso de separación que utiliza alto vacío y tiempos cortos de exposición del material a la temperatura de operación.• Requiere de un evaporador que reduce las temperaturas de destilación de los componentes de la mezcla. |

Fuente: elaboración propia.

1.2 EL SACHA INCHI (*Plukenetia volubilis*)

1.2.1 Características de la planta. El nombre sachá Inchi proviene de la lengua indígena quechua de los andes peruanos, donde “sachá” significa monte e “inchi” maní, esto debido a las características de la semilla de la planta y a la ubicación de su cultivo dentro de la Amazonía peruana.²⁸ Esta planta es una oleaginosa

²⁵ RODRIGUEZ, Mailén. Uso del análisis por inyección en flujo multijeringa en determinaciones analíticas acoplado a técnicas cromatográficas. [En línea]. Tesis Doctoral. Universitat de les Illes Balears, España: 2014. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/288204/tmfr1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

²⁶ PRADOS, Isabel. Concentración de ácidos grasos poliinsaturados y análisis de uretanos en la formación de complejos con urea. [En línea]. Trabajo de Fin de Máster: Máster en Química Agrícola y Nuevos Alimentos. Instituto de Investigación en Ciencias de la Alimentación, España: 2015. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/152136>

²⁷ ORREGO, Jorge. Fraccionamiento por destilación molecular y caracterización de fondos de vacío de crudos colombianos. [En línea]. Trabajo de grado de investigación para optar por el título de Doctor en Química. Universidad Industrial de Santander, Santander: 2014. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2014/151313.pdf>

²⁸ ALAYÓN, Alicia., ECHEVERRI, Isabella. Sachá inchi (*Plukenetia volubilis* Hnneo): ¿una experiencia ancestral desaprovechada? Evidencias clínicas asociadas a su consumo. En: Revista Chilena de Nutrición. 2016. Vol.43. No.2. p. 167. ISSN 0717-7518

generalmente trepadora de la familia de las Euforbiáceas, del género *Plukenetia* el cual está conformado por 19 especies, donde 12 de estas especies han sido encontradas en diferentes países del continente americano específicamente en la parte sur y central como se puede observar en la imagen 4, destacando a Perú, Colombia, Bolivia, Ecuador y Brasil, lugares que por su ubicación geográfica permiten el crecimiento y desarrollo de las especies de sacha inchi; mientras que las demás especies están ubicadas en Madagascar.²⁹

Imagen 4. Distribución de los cultivos de sacha inchi en América.



Fuente: GLOBAL BIODIVERSITY INFORMATION FACILITY (GBIF). *Plukenetia volubilis* L. [Sitio web]. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.gbif.org/species/3070717>

En cuanto las características de la planta, en la imagen 5 se pueden observar las partes que la conforman. Sus hojas son alternas de forma acorazonada de 10 a 12 centímetros de largo y de 8 a 10 centímetros de ancho. Es una planta hermafrodita, es decir que las flores presentan una polinización cruzada y se pueden observar 2 tipos de flores, las flores masculinas las cuales son pequeñas, blanquecinas, dispuestas en racimos y las femeninas que se encuentran en la base del racimo.³⁰ El fruto del sacha inchi corresponde a cápsides en forma de estrella de 3,5 a 4,5 centímetros de diámetro, con cuatro lóbulos aristados (tetralobados). Dentro de la cápside se encuentran 4 lóbulos y algunas plantas presentan cápsides con cinco a nueve lóbulos.³¹

²⁹ GILLESPIE, Lynn. A Synopsis of Neotropical *Plukenetia* (*Euphorbiaceae*) Including Two New Species. En: American Society of Plant Taxonomists. 1993. Vol.18.No. 4. p.576.

³⁰ AYALA, Guillermo. Análisis de crecimiento y producción de 3 variedades de sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.), en el municipio de Tena Cundinamarca. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad de ciencias aplicadas y ambientales U.D.C.A, Bogotá D.C: 2016. pp.13-14. [Consultado 10, abril, 2020] Disponible en: <https://repository.udca.edu.co/bitstream/11158/487/1/TESIS%20SACHA%20INCHI.pdf>

³¹ MINISTERIO DE COMERCIO EXTERIOR Y TURISMO. Manual de producción de sacha inchi para el biocomercio y la agroforestería sostenible. [En línea]. 2009. Primera edición. p.10. [Consultado 08,

Imagen 5. Planta de sacha inchi (SI).



Fuente: INDECOPI. Comisión Nacional Contra La Biopiratería. [En línea]. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.indecopi.gob.pe/documents/20791/2291514/Boletin+N%C2%B0+7+++Sacha+inchi.pdf/dd949728-fe4b-6bcc-1130-b09261758790>

En la imagen 6 se puede observar las semillas y almendras del fruto de sacha inchi, donde las semillas en su mayoría son ovaladas de color marrón oscuro, ligeramente abultadas en el centro y aplastadas en el borde, mientras que la almendra es de un color claro y es de donde se extrae el aceite.³²

Imagen 6. Semillas y almendras del sacha inchi.



Fuente: elaboración propia.

1.2.2 Composición nutricional de la semilla. Existen evidencias de que el sacha inchi formaba parte de la dieta alimenticia de las culturas inca y pre-inca debido a su alto valor nutricional, al tener gran contenido en grasas y proteínas respecto a otras semillas amazónicas.³³ Dado que el género *Plukenetia volubilis* es el más

abril, 2020]. Disponible en: https://issuu.com/agronegocioscr/docs/manual_de_produccion_de_sacha_inchi_para_web

³² *Ibíd.*, p.10.

³³ MONSALVE, Laura. Plan de negocio para la empresa omega snack dedicada a la producción y comercialización de snack de sacha inchi en el Valle de Aburra. [En línea]. Trabajo de grado.

conocido en cuanto a propiedades agronómicas, agroindustriales y comerciales, existen varios estudios enfocados en su caracterización fisicoquímica, contenido de nutrientes y caracterización de ácidos grasos de la almendra como se observa en la tabla 1, permitiendo comparar su composición con otras semillas oleaginosas de interés.

Tabla 1. Valores de referencia de la composición nutricional de la semilla de sachá inchi por 100 gramos de semilla (% m/m).

| Compuesto | Semilla <i>Plukenetia volubilis L.</i> |
|---------------|---|
| Grasa | 49,0 ± 1,0 |
| Proteínas | 29,6 ± 0,5 |
| Cenizas | 2,7 ± 0,2 |
| Fibra | 6,6 ± 0,7 |
| Carbohidratos | 12,1 ± 1,2 |

Fuente: elaboración propia, con base en: RUIZ, Candy, et al. Análisis proximal, antinutrientes, perfil de ácidos grasos y de aminoácidos de semillas y tortas de 2 especies de Sachá inchi (*Plukenetia volubilis* y *Plukenetia huayllabambana*). En: Revista de la Sociedad Química del Perú. 2013. Vol.79. No.1. p.32. ISSN 1810-634X

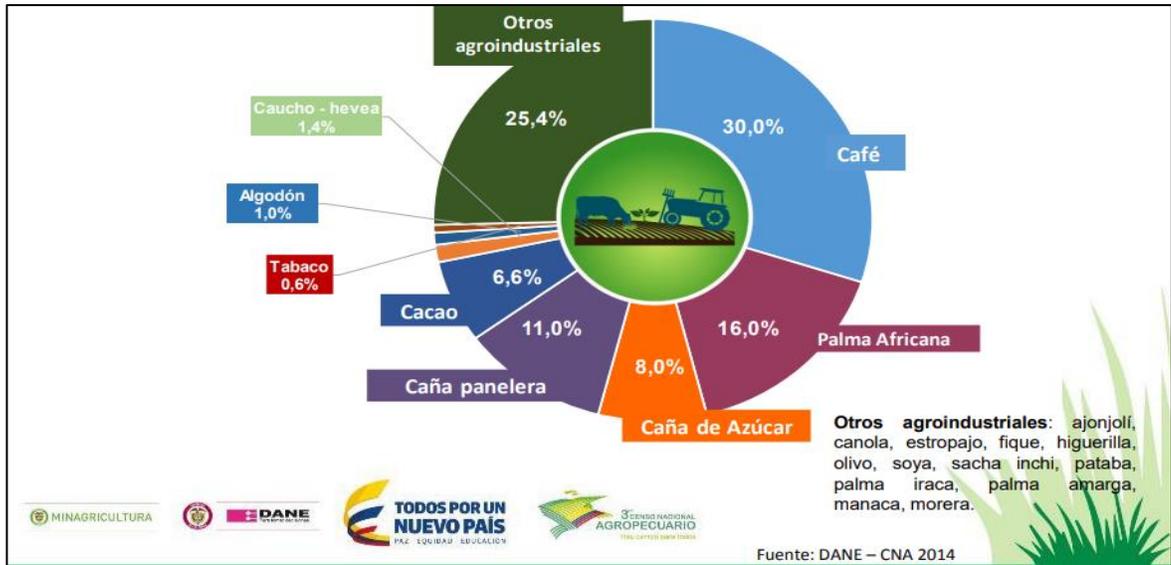
1.2.3 Cultivo de Sachá inchi en Colombia. Colombia, Ecuador y Perú son los países con mayor producción en el mundo de semilla de sachá inchi. En Colombia según datos del DANE, en el año 2014 la participación del área agrícola llamada “otros agroindustriales” donde se cultivan productos como: higuera, sachá inchi, ajonjolí, entre otros, correspondió al 25,4% ocupando el segundo lugar después del café³⁴, como se puede observar en la gráfica 1. Los reportes del Global Biodiversity Information Facility indican que la distribución geográfica de diferentes especies de *Plukenetia spp* se encuentra en departamentos como: Chocó, Antioquia, Valle del Cauca, Caquetá, Vichada, Putumayo, Meta, Amazonas y Guaviare, siendo el departamento de Putumayo el líder de la producción colombiana de sachá inchi al ser la región con más hectáreas plantadas en el país.³⁵

Universidad EIA. Envigado: 2016.p.19. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/2200/1/MonsalveLaura_2016_PlanNegocioEmpresa.pdf

³⁴ Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Censo Nacional Agropecuario 2014. [Sitio web]. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/files/CensoAgropecuario/entrega-definitiva/Boletin-9-cultivos/9-presentacion.pdf>

³⁵ IBAÑEZ, José. Fortalecimiento socioempresarial y adecuación financiera. [En línea]. En: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI. 2017. p.28. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en:

Gráfica 1. Participación porcentual de área agrícola dedicada a cultivos agroindustriales en área rural dispersa censada.



Fuente: DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE). Censo Nacional Agropecuario 2014. [Sitio web]. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/files/CensoAgropecuario/entrega-definitiva/Boletin-9-cultivos/9-presentacion.pdf>

1.2.4 Potencial del cultivo de sacha inchi y producción de aceite. El potencial del cultivo de sacha inchi en Colombia se caracteriza porque la semilla tiene un alto nivel nutricional al ser rica en ácidos grasos insaturados (omega-3, 6 y 9) y proteínas respecto a otras semillas amazónicas.³⁶ Además, puede un posible sustituto de cultivos ilícitos en el país debido a su alta rentabilidad, ya que según la revista Dinero³⁷: “por la producción de una hectárea un campesino puede recibir entre \$15 millones y \$18 millones, frente a \$20 millones de la coca, lo que lo convierte en un verdadero sustituto”. Sin embargo, al ser una planta poco conocida en Colombia, aproximadamente el 90% de la cosecha tiene como destino el mercado internacional³⁸ lo que le confiere un gran potencial de exportación.

https://sinchi.org.co/files/gef/PUBLICACIONES/1.%20Fortalecimiento%20Socioempresarial%20AS OPROAGRO_compressed.pdf

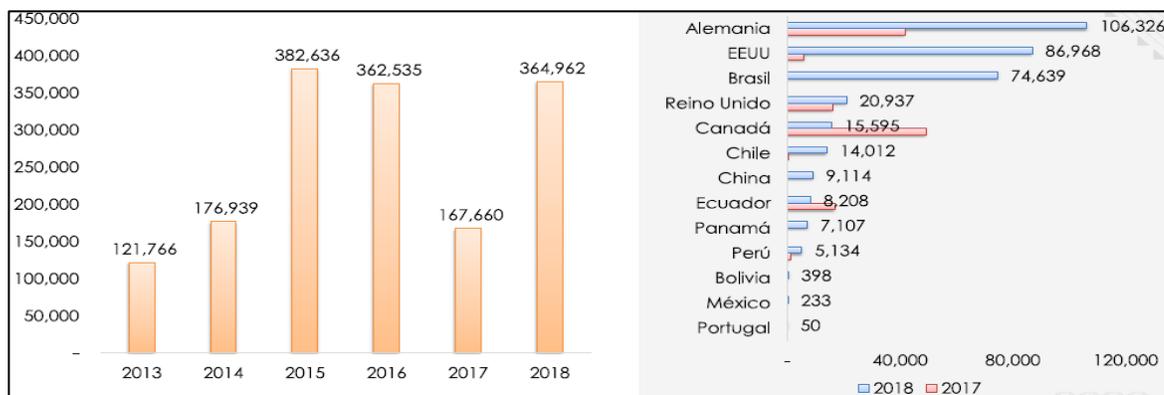
³⁶ REVISTA PERFIL. Conozca la sacha inchi: la semilla milagrosa utilizada por los incas. [Sitio web]. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.revistaperfil.com/bienestar/nutricion/conozca-la-sacha-inchi-la-semilla-milagrosa/TB5JQGUB2VA7TCRIFRQZ63HCFA/story/>

³⁷ REVISTA DINERO. La planta que le quita terreno a la coca en Colombia. 2019. [Sitio web] [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <http://www.dinero.com/edicion-impresa/negocios/articulo/la-planta-que-puede-competir-en-rentabilidad-con-la-coca/267323>

³⁸ GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA. Cundinamarca apoya la comercialización del Sacha inchi. 2019. [Sitio web]. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <http://www.cundinamarca.gov.co/Home/prensa2018/asnoticias/prensa/cundinamarca+poya+la+comercializacion+del+sacha+inchi>

Actualmente el producto de sacha inchi que más se comercializa es el aceite para el consumo, debido a sus propiedades medicinales y aporte de nutrientes. Según datos del DANE en los últimos cinco años, las exportaciones colombianas de “otros aceites” como: aguacate, sacha inchi, chia, entre otros, crecieron un 199,7% como se puede observar en la gráfica 2, siendo Alemania y Estados Unidos los principales destinos de estas exportaciones.

Gráfica 2. Exportaciones colombianas de "otros aceites" y principales destinos.



Fuente: PROCOLOMBIA. Aliado estratégico de negocios para la cadena del sacha inchi [Sitio web]. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <http://www.procolombia.co>

1.3 ACEITE DE SACHA INCHI

1.3.1 Características fisicoquímicas del aceite de sacha inchi. Las características nutritivas del aceite de sacha inchi están dadas por su alto contenido de ácidos grasos insaturados, y por tener el contenido más bajo de ácidos grasos saturados, superando a otras oleaginosas utilizadas en el mundo para la producción de aceites destinados al consumo humano.³⁹ Esto se puede evidenciar en la tabla 2, donde en una investigación se realizó una comparación de propiedades fisicoquímicas entre el sacha inchi y otras semillas de interés. Allí se pudo observar que el sacha inchi tuvo la mayor cantidad de ácidos grasos insaturados correspondientes al 88,79% y la menor cantidad de ácidos grasos saturados equivalentes al 8,94% con respecto a las demás semillas utilizadas en la caracterización.

³⁹ INKANATURAL. Aceite de Sacha inchi. [Sitio web]. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.inkanatural.com/es/arti.asp?ref=aceite-de-sacha-inchi%20>

Tabla 2. Caracterización del sacha inchi y otras semillas oleaginosas.

| NUTRIENTES [%] | SEMILLAS DE OLEAGINOSAS | | | | | | |
|--------------------|-------------------------|------|------|---------|---------|-------|-------|
| | SACHA INCHI | SOYA | MANÍ | ALGODÓN | GIRASOL | OLIVA | PALMA |
| Proteínas | 29 | 28 | 23 | 32,9 | 24 | 1,6 | 0 |
| SATURADOS | | | | | | | |
| Mirístico | 1,24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Palmitico | 4,5 | 10,5 | 12 | 18,7 | 7,5 | 13 | 45 |
| Esteárico | 3,2 | 3,2 | 2,2 | 2,4 | 5,3 | 3 | 4 |
| INSATURADOS | | | | | | | |
| Oleico | 9,6 | 22,3 | 41,3 | 18,7 | 29,3 | 71 | 40 |
| Linoleico | 36,99 | 54,5 | 36,8 | 57,5 | 57,9 | 10 | 10 |
| Linolénico | 42,2 | 8,3 | 0 | 0,5 | 0 | 1 | 0 |
| RESUMEN | | | | | | | |
| SATURADOS | 8,94 | 13,7 | 14,2 | 21,1 | 12,8 | 16 | 49 |
| INSATURADOS | 88,79 | 85,1 | 79,5 | 77,3 | 87,2 | 82 | 50 |

Fuente: MANCO, E. Situación y avances del cultivo de sacha inchi en el Perú. 2003. Citado por: AYALA, Guillermo. Análisis de crecimiento y producción de 3 variedades de sacha inchi (*Plukenetia volubilis L.*), en el municipio de Tena Cundinamarca. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad de ciencias aplicadas y ambientales U.D.C.A, Bogotá D.C: 2016. p.16. [Consultado 10, abril, 2020] Disponible en: <https://repository.udca.edu.co/bitstream/11158/487/1/TESIS%20SACHA%20INCHI.pdf>

1.3.2 Métodos de extracción del aceite. Existen diferentes métodos de extracción de aceite a partir de las semillas de sacha inchi. Entre ellos se encuentran los métodos físicos donde se realiza un prensado de la semilla y por otro lado están los métodos químicos donde se extrae el aceite con el uso de solventes o por un proceso de destilación. El uso de cada método provoca variaciones en cuanto al rendimiento del aceite, su composición química y su calidad.⁴⁰

1.3.2.1 Extracción por prensado. El procedimiento usual de extraer aceite comienza con una selección de forma manual de los frutos que se encuentren en su etapa de maduración final, específicamente entre el mes 7 y 19 después de su desarrollo vegetativo que se da entre el mes 5 y 7. Posterior a este periodo se realiza la recolección de las semillas y con el uso de una descascarilladora se obtienen las almendras maduras que serán utilizadas en el proceso de prensado. Este inicia con la trituración de la almendra por medio de un molino de discos.

⁴⁰ GUTIERREZ, Nelson., SAÁ, Irene., VINUEZA, Alexy. Diseño y construcción de un prototipo para la extracción continua de aceite de la semilla Sacha Inchi con un proceso de prensado en frío. En: Enfoque UTE. 2017. Vol.8. No.2. p.18.

Posterior a la trituración se realiza un tamizado para disminuir el tamaño de partícula (generalmente 2, 4 y 6 mm). Luego de esto, se utiliza una prensa hidráulica acoplada a un manómetro de presión (160-200bar) durante 15 minutos para extraer el aceite. Finalmente, el aceite crudo de sacha inchi obtenido se filtra utilizando una bomba de vacío con el fin de obtener un aceite puro y limpio.⁴¹

En el diagrama 1 se puede observar el proceso por el cual se obtiene el aceite de sacha inchi por el método de extracción por prensado. Al producto final obtenido por este método se le denomina aceite virgen.

Diagrama 1. Extracción por prensado del aceite de sacha inchi (SI).



Fuente: SISTEMA GENERAL DE REGALÍAS (SGR). Prototipo del proceso para la obtención de harina de Sacha Inchi (*Plukenetia volúbilis* L.) a partir de la torta residual de la extracción del aceite. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/1026154/presentacin-comp7-25022015-primer-encuentro-regional-del-sacha-inchi>

1.3.2.2 Extracción con disolventes. El objetivo de la extracción con disolventes es eliminar el aceite de la semilla oleaginosa tanto como sea posible. Este proceso se puede observar en el diagrama 2, iniciando con el lavado y secado de las semillas seleccionadas. Posterior a esto se realiza la elección del disolvente con base en la solubilidad del tipo de aceite y dependiendo de su costo y seguridad. Los disolventes más utilizados para la extracción de aceites son pentano, hexano, heptano y octano.⁴² Según el disolvente utilizado, se emplea una columna de destilación para extraer la mayor parte del disolvente y recircularlo en el proceso. Luego de esto el aceite crudo se purifica para eliminar las impurezas suspendidas.

⁴¹ SIHUAYRO, Dennys. Evaluación del rendimiento en la extracción del aceite de sacha inchi (*Plukenetia volúbilis* L.) del ecotipo predominante en el valle del río apurímac (Ayacucho) y su caracterización físico-química y sensorial. Citado por: AYALA, Guillermo. Op. Cit., p.27.

⁴² AYALA, Guillermo. Op. Cit., p.28.

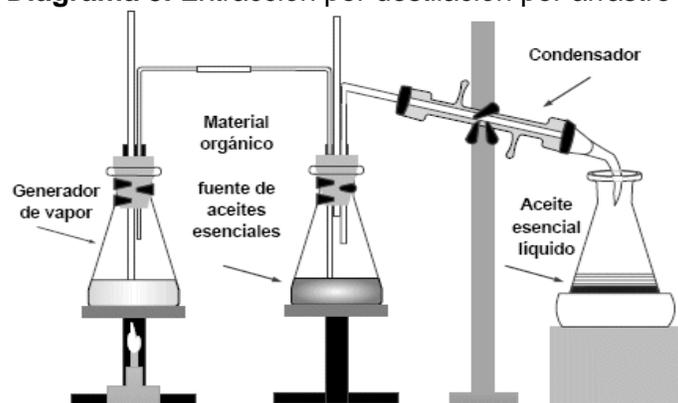
Diagrama 2. Extracción de aceites con disolventes.



Fuente: elaboración propia.

1.3.2.3 Destilación por arrastre de vapor. La destilación por arrastre de vapor es una técnica que permite la separación de sustancias insolubles en H_2O y ligeramente volátiles de otros productos no volátiles. A la mezcla que contiene el producto que se pretende separar, se le adiciona un exceso de agua, y el conjunto se somete a destilación. En el matraz de destilación se recuperan los compuestos no volátiles y/o solubles en agua caliente, y en el matraz colector se obtienen los compuestos volátiles e insolubles en agua. Finalmente, el aislamiento de los compuestos orgánicos recogidos en el matraz colector se realiza mediante una extracción.⁴³

Diagrama 3. Extracción por destilación por arrastre de vapor.



Fuente: BALBOA Laura, MILENKA Hilda. Equipo experimental para la destilación por arrastre de vapor (dav) de aceites esenciales, caso: cáscara de naranja dulce (*Citrus sinensis*). En: Revista Tecnológica. Vol.12. No.18. p.13. ISSN 1729-7532

⁴³ UNIVERSIDAD DE BARCELONA. Tipos de destilación. [Sitio web]. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/destilacio_tipus.html#vapor

1.3.3 Aplicaciones del aceite de sachá inchi. El aceite de sachá inchi extraído de las semillas de la planta, tiene un alto potencial agro-tecnológico y aplicaciones en diferentes industrias debido a su elevado contenido de ácidos grasos insaturados y antioxidantes.⁴⁴ A continuación, se mencionan algunos de sus usos.

- **Uso medicinal**

El aceite de sachá inchi generalmente tiene aplicaciones en la industria alimentaria ya que tiene un alto valor nutricional al ser rico en antioxidantes y ácidos grasos poliinsaturados.⁴⁵ Debido a su alto porcentaje de ácidos grasos omega-3, se usa en tratamientos de medicina alternativa ya que consumo se asocia con una mejora de los perfiles lipídicos disminuyendo niveles altos de colesterol y triglicéridos, además de reducir del riesgo cardiovascular al tener una influencia positiva en el flujo y coagulación sanguínea.⁴⁶ Adicional a esto, se presume que se pueden obtener mejoras de salud en enfermedades como la diabetes, la artritis e incluso en el caso de ciertos trastornos psicológicos y cánceres.⁴⁷

- **Formulación de alimentos**

Al ser un aceite altamente insaturado se puede llevar a cabo un proceso de fraccionamiento donde el aceite se derrite completamente a -5°C.⁴⁸ Esta temperatura tiene influencia en las propiedades de fusión, en la estabilidad y sensación en la boca de los productos que contengan su aceite. Por lo tanto, estas propiedades sensoriales son muy importantes para determinar la aceptación o rechazo de los consumidores.⁴⁹

- **Uso cosmético**

El aceite de sachá inchi también tiene aplicación en el sector cosmético debido a su alto contenido de alfa-tocoferol (una forma de vitamina E) que le confiere una alta actividad antioxidante previniendo la peroxidación lipídica en tejidos y alimentos biológicos.⁵⁰ Debido a esto se han desarrollado productos cosméticos que contienen aceite de sachá inchi en su preparación, los cuales ya han sido

⁴⁴ ALAYÓN, Alicia., ECHEVERRI, Isabella. Op. Cit., p.167.

⁴⁵ *Ibíd.*, p.167.

⁴⁶ HANSEN, Hans., SCHMITZ, Markus. Sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) Nut Oil and Its Therapeutic and Nutritional Uses. En: Nuts & Seeds in Health and Disease Prevention. 2011. Capítulo 117. p.993.

⁴⁷ *Ibíd.*, p.993.

⁴⁸ GUTIERREZ, Luis., ROSADA, Lina., JIMÉNEZ, Álvaro. Chemical composition of Sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) seeds and characteristics of their lipid fraction. En: Grasas y Aceites. 2011. Vol. 62. No. 1. p. 82.

⁴⁹ WANG, Susan., ZHU, Fan., KAKUDA, Yukio. Sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.): Nutritional composition, biological activity, and uses. En: Food Chemistry. 2018. Vol.265. p.325.

⁵⁰ CHIRINOS, Rosana, et al. Sachá inchi (*Plukenetia volubilis*): A seed source of polyunsaturated fatty acids, tocopherols, phytosterols, phenolic compounds and antioxidant capacity. En: Food Chemistry. 2013. Vol. 141. No. 3. p.1734.

patentados. Estos productos además de tener efectos antienviejimiento, se aplican en la piel como antiinflamatorios y tensores.⁵¹

- **Elaboración de nanopartículas**

El aceite de sacha inchi ha funcionado como materia prima para la elaboración de un nanocatalizador de plata preparado a través de la reducción de iones de plata por los ácidos grasos omega-3, omega-6 y omega-9 del aceite. Esta nanopartícula fue usada para la bioremediación de azul de metileno sin hacer uso de ningún agente reductor convencional, dando un enfoque experimental simple, rápido, rentable y ecoamigable según lo reportado por los investigadores.⁵²

- **Producción de biodiesel**

Zuleta, et al⁵³ en el año 2012 estudiaron las mezclas de biodiesel de palma y aceite de sacha inchi y determinaron su estabilidad oxidativa y punto de obstrucción de filtro frío. Allí encontraron que la estabilidad oxidativa dependía principalmente del contenido de ésteres metílicos insaturados, donde el aceite de sacha inchi contenía una cantidad significativa de ésteres metílicos de tipo linoleico y linolénico, lo que lo hacía más propenso a la oxidación. Debido a esto, las mezclas de aceite de palma y aceite de sacha inchi no cumplieron con los estándares de calidad en cuanto a la estabilidad oxidativa. Sin embargo, los investigadores proponen el uso de aditivos para lograr las propiedades fisicoquímicas que se requieren para la producción de biodiesel.

⁵¹ WANG, Susan., ZHU, Fan., KAKUDA, Yukio. Op. Cit., p.325.

⁵² KUMAR, Brajesh, et al. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis L.*) oil for one pot synthesis of silver nanocatalyst: An ecofriendly approach. En: Industrial Crops and Products. 2014. Vol.58. p.239.

⁵³ ZULETA, Ernesto., RIOS, Luis., BENJUMEA, Pedro. Oxidative stability and cold flow behavior of palm, sacha-inchi, jatropha and castor oil biodiesel blends. En: Fuel Processing Technology.2012. Vol.102. p.98.

2. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE VIRGEN DE SACHA INCHI

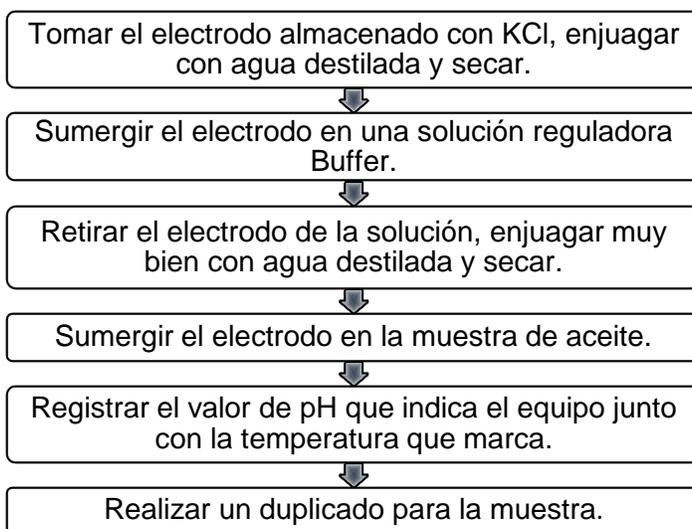
Para la caracterización del aceite virgen de sacha inchi, se realizaron algunas pruebas fisicoquímicas con el fin de determinar el estado inicial del aceite el cual fue proporcionado por la empresa BioRefinería S.A.S. Con esto se busca identificar aquellas pruebas de mayor importancia que deben ser tenidas en cuenta para un posterior procesamiento del aceite.

2.1 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA

2.1.1 pH. A pesar de que los aceites vegetales y las grasas tienen un bajo contenido de agua, es posible determinar el valor de pH como una medida de acidez del aceite. Esta medida indica la presencia de los ácidos grasos libres que se encuentran en la muestra, los cuales representan un indicador básico de la autenticidad del producto y de su calidad.⁵⁴

Para la determinación del pH de las muestras de aceite se utilizó como referencia la norma NTC 3651:2012 donde indican el método para examinar la calidad del agua el cual se describe en el diagrama 4.

Diagrama 4. Procedimiento para la determinación del pH del aceite según NTC 3651:2012.



Fuente: elaboración propia.

⁵⁴ FOODLAB. Análisis de acidez en aceites y grasas comestibles. [Sitio web]. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.cdrfoodlab.es/alimentos-bebidas-analisis/acidez-aceite-grasas/>

2.1.2 Densidad. La densidad es una propiedad muy importante en los aceites vegetales ya que define su naturaleza y su posibilidad de uso en distintas aplicaciones.⁵⁵

Según la norma NTC 336:2016, el método de determinación de densidad es la relación entre la masa del aceite en aire con su volumen a una temperatura dada, utilizando un picnómetro calibrado.⁵⁶ El procedimiento que se utiliza para su determinación depende del picnómetro que se vaya a usar. Por lo tanto, en el diagrama 5 se muestra el procedimiento que se llevó a cabo en el laboratorio con un picnómetro de Gay-Lussac.

Diagrama 5. Procedimiento para la determinación de la densidad del aceite según NTC 336:2016.



Fuente: elaboración propia.

⁵⁵ LÓPEZ, William., VALERO, Sigrid. Estudio de la estabilidad, bajo condiciones de almacenamiento, del biodiesel obtenido a partir de aceite reciclado de cocina. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad Libre de Colombia, Bogotá D.C: 2015. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7947/Documento%20William-%20Esmeralda.pdf?sequence=1>

⁵⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grasas y aceites animales y vegetales. Método de la determinación de la densidad (masa por volumen convencional). NTC 336:2016. Bogotá, D.C: El instituto.11p.

Para el cálculo de la densidad se debe emplear la ecuación 1, según la norma mencionada.

Ecuación 1. Cálculo de la densidad en aceites y grasas según NTC 336:2016.

$$\rho_{\theta} = \frac{m_2 - m_1}{V_d} + k(\theta_d - \theta)$$

Donde:

m_1 = es la masa del picnómetro vacío con tapa.

m_2 = es la masa del picnómetro lleno con la muestra de ensayo y tapa.

V_d = es el volumen del picnómetro a la temperatura θ_d en mililitros.

θ_d = es la temperatura a la cual fue realizada la determinación en grados Celsius.

θ = es la temperatura a la cual la densidad (masa por volumen convencional) es para ser establecida, en grados Celsius.

k = es el cambio medio de la densidad (masa por volumen convencional) de las grasas debido al cambio de temperatura, en gramos por mililitro grados Celsius ($k = 0,00068$ g/ml por grado Celsius).

2.1.3 Índice de acidez. El índice de acidez es un indicador de la calidad del aceite que se relaciona con las características propias de la materia prima utilizada y de las condiciones de procesamiento y almacenamiento.⁵⁷ Corresponde al número en miligramos de hidróxido de potasio necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres contenidos en 1 gramo de grasa o aceite.⁵⁸ Para su determinación, según la norma NTC 218:2011, se debe usar la tabla 3 para determinar la masa de la porción de ensayo y así mismo la concentración de la solución de álcali requerida según el porcentaje de acidez que se espera.

⁵⁷ MANRIQUE, Guillermo. Caracterización de aceites y grasas. [En línea]. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: https://www.fio.unicen.edu.ar/usuario/gmanrique/images/Grasas_y_Aceites.pdf

⁵⁸ GARCÍA, Eva., FERNÁNDEZ, Isabel., FUENTES, Ana. Determinación del enranciamiento hidrolítico de un aceite de oliva mediante el grado de acidez. [En línea]. Universidad Politécnica de Valencia. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/b710/007769396cb87162320f87f3d2621bf6baf8.pdf>

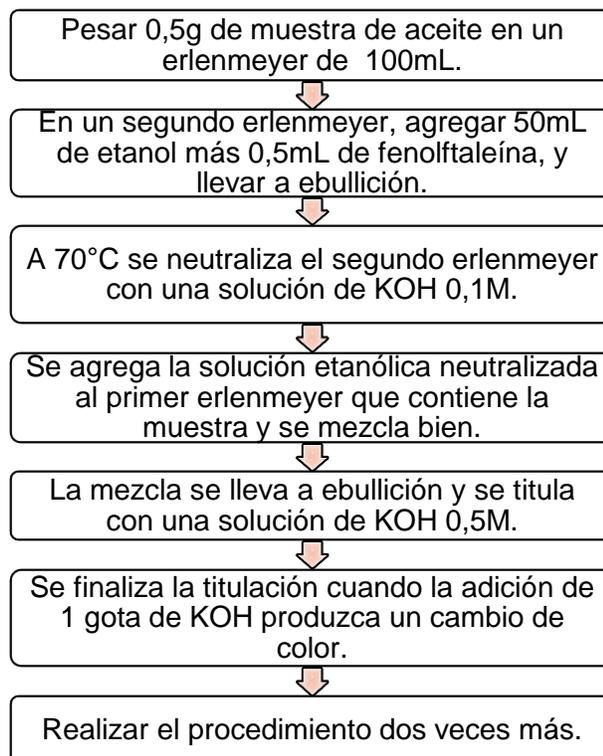
Tabla 3. Masa de porción de ensayo y concentración de solución de álcali según el porcentaje de acidez esperado.

| Porcentaje de acidez esperado, | Masa de la porción de ensayo g | Concentración de la solución de álcali | Precisión en el pesaje |
|--------------------------------|--------------------------------|--|------------------------|
| <1 | 28,0 | 0,05 | 0,02 |
| 1 a 4 | 7,0 | 0,10 | 0,02 |
| 4 a 15 | 2,5 | 0,25 | 0,01 |
| 15 a 75 | 0,5 | 0,5 | 0,001 |
| >75 | 0,1 | 0,5 | 0,000 2 |

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de acidez y de la acidez. NTC 218:2011. Bogotá, D.C: El instituto.16p.

Según la norma mencionada anteriormente, el procedimiento que se llevó a cabo para su determinación se muestra en el diagrama 6.

Diagrama 6. Procedimiento para la determinación del índice de acidez y de la acidez del aceite según norma NTC 218:2011



Fuente: elaboración propia.

Una vez terminado el proceso descrito, se emplea la ecuación 2 para el cálculo del índice de acidez.

Ecuación 2. Cálculo del índice de acidez para aceites y grasas según NTC 218:2011.

$$IA = \frac{56,1 \times V \times c}{m}$$

Donde:

56,1= masa molar del hidróxido de potasio.

V= es el volumen en mililitros de la solución volumétrica normalizada de hidróxido de sodio o de potasio.

c = es la concentración exacta, en moles por litro, de la solución volumétrica normalizada de hidróxido de sodio o de potasio.

m= es la masa, en gramos, de la porción de ensayo.

2.1.4 Acidez. El grado de acidez es el contenido en porcentaje de los ácidos grasos libres presentes en un aceite. Esta es una de las características que mejor definen la calidad de un aceite ya que representa el deterioro hidrolítico al que ha sido sometido.⁵⁹ En los aceites vegetales, este contenido se expresa como si todos los ácidos grasos libres fueran ácido oleico, y se determina según la norma NTC 218:2011 realizando el procedimiento que se encuentra en el diagrama 6. Luego de esto se emplea la ecuación 3 para determinar el grado de acidez presente en el aceite.

Ecuación 3. Cálculo de la acidez en aceites y grasas según NTC 218:2011.

$$Acidez = V \times c \times \frac{M}{1000} \times \frac{100}{m} - \frac{V \times c \times M}{10 \times m}$$

Donde:

V = es el volumen, en mililitros, de la solución volumétrica normalizada de hidróxido de sodio o de potasio.

⁵⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de acidez y de la acidez. NTC 218:2011. Bogotá, D.C: El instituto.16p.

c = es la concentración exacta, en, moles por litro, de la solución normalizada de hidróxido de sodio o de potasio usada.

M = es la masa molar, en gramos por mol, del ácido escogido para la expresión de los resultados.

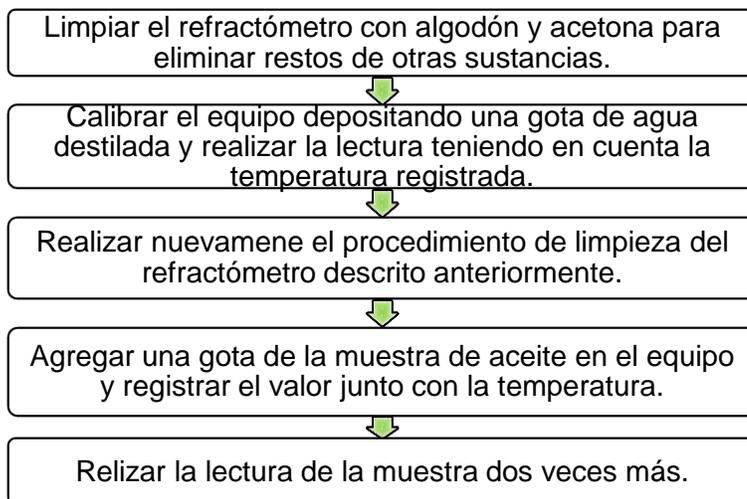
m = es la masa, en gramos, de la porción de ensayo.

2.1.5 Índice de refracción. El índice de refracción se define como el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio a otro distinto. Este depende del carácter de la sustancia y de su estado al momento de realizar la prueba.⁶⁰

En aceites vegetales, es una forma de determinar la pureza del aceite ya que está relacionado con el grado de oxidación que tiene, con su grado de insaturación y con la razón cis/trans de los dobles enlaces.⁶¹ Además, se ve afectado por la temperatura al tener una relación inversamente proporcional al igual que con el contenido de ácidos grasos libres.

Para determinar el valor del índice de refracción en grasas y aceites se sigue la norma NTC 289:2002. El proceso utilizado se describe en el diagrama 7.

Diagrama 7. Procedimiento para la determinación del índice de refracción del aceite según NTC 289:2002.



Fuente: elaboración propia.

⁶⁰ GRASAS Y ACEITES COMESTIBLES. Índice de refracción. [En línea]. Universidad de Antioquia. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <http://docencia.udea.edu.co/qf/grasas/refraccion.html>

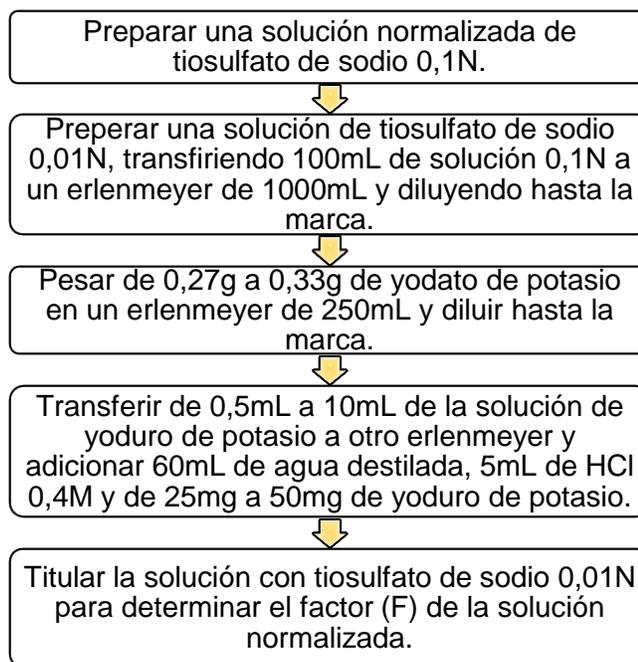
⁶¹ GUTIERREZ, A. Apéndice A - descripción de análisis del aceite. [En línea]. Universidad de las Américas Puebla. p.76. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mepi/gutierrez_a_ba/apendiceA.pdf

2.1.6 Índice de peróxidos. El índice de peróxidos es una estimación del contenido de sustancias que oxidan el yoduro potásico y se expresa en términos de mili-equivalentes de oxígeno activo por cada kilogramo de grasa. Este se asocia con la presencia de peróxidos derivados de los ácidos grasos presentes en la muestra de aceite o grasa.⁶²

El valor del índice de peróxidos es un indicador de la calidad del aceite, ya que generalmente la causa más común de deterioro y rancidez es la oxidación, presentando problemas de sabor y olor debido a las cetonas y aldehídos en los que se descompone.⁶³

Por lo anterior, el método usual para evaluar el grado de oxidación según la norma NTC 236:2011 se puede observar en el diagrama 8.

Diagrama 8. Procedimiento para la determinación del factor de la solución de tiosulfato de sodio 0,01N según NTC 236:2011.



Fuente: elaboración propia.

⁶² FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA EL DESARROLLO DE LA NUTRICIÓN ANIMAL. Índice de peróxidos. [Sitio web]. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: http://www.fundacionfedna.org/tecnicas_de_analisis/%C3%ADndice-per%C3%B3xidos

⁶³ GUTIERREZ, A. Op. Cit., p.77.

Para el cálculo del índice de peróxidos se debe determinar el factor de la solución normalizada de tiosulfato de sodio 0,01N usando la ecuación 4, para después poder calcular el valor del índice.⁶⁴

Ecuación 4. Cálculo del factor de la solución normalizada de tiosulfato según NTC 236:2011.

$$F = \frac{m_{KIO_2} \times V_1 \times 6 \times 1000 \times w_{KIO_2}}{M_{KIO_2} \times V_2 \times V_3 \times c_{KIO_2} \times 100}$$

Donde:

m_{KIO_2} = es la masa de yodato de potasio, en gramos.

V_1 = es el volumen de la solución de yodato de potasio, utilizado para la determinación del título (5mL o 10mL).

6 = es la masa equivalente para el título (1 mol $KIO_2 \leftrightarrow 3$ mol I_2).

w_{KIO_2} = es la pureza del yodato de potasio en g/100g.

M_{KIO_2} = es la masa molecular del yodato de potasio (214g/mol).

V_2 = es el volumen total de la solución de yodato de potasio, en mililitros (250mL o 500mL).

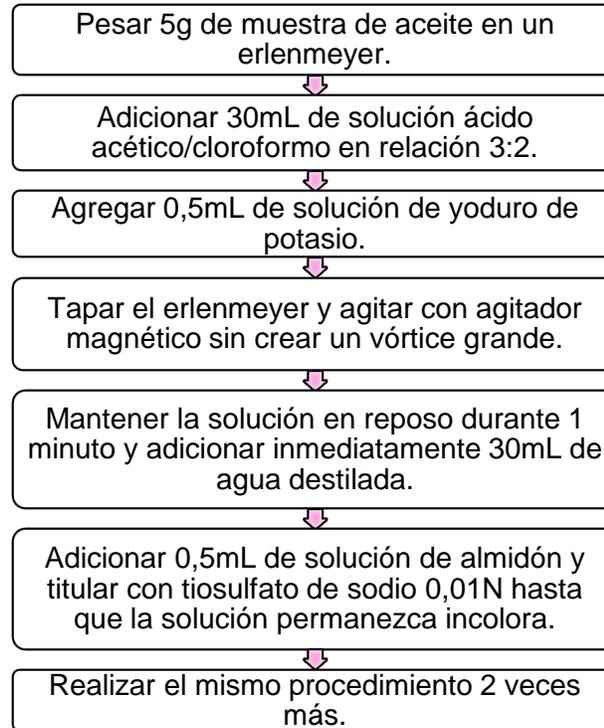
V_3 = es el volumen de la solución de tiosulfato 0,01N utilizado para la determinación, en mililitros.

c_{KIO_2} = es la concentración de la solución normal de tiosulfato de sodio en moles por litro (0,01mol/L)

Una vez calculado el factor de la solución normalizada, se emplea el diagrama 9 en el cual se describe el procedimiento para determinar el índice de peróxidos del aceite y finalmente se calcula con la ecuación 5.

⁶⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de peróxido. NTC 236:2011. Bogotá, D.C: El instituto.13p.

Diagrama 9. Procedimiento para la determinación del índice de peróxidos del aceite según NTC 236:2011.



Fuente: elaboración propia.

Ecuación 5. Cálculo del índice de peróxidos en aceites y grasas según NTC 236:2011.

$$IP = \frac{(V - V_o) \times c \times F \times 1000}{m}$$

Donde:

V = es el volumen de la solución de tiosulfato de sodio utilizado para la determinación, en mililitros.

V_o = es el volumen de la solución normal de tiosulfato de sodio utilizado para el ensayo blanco, en mililitros.

F = es el factor de la solución de tiosulfato de sodio 0,01N.

c = es la concentración de tiosulfato de sodio, en moles por litro.

m = es la masa de la porción de ensayo, en gramos.

2.1.7 Índice de yodo. El índice de yodo de un aceite mide el contenido de dobles enlaces capaces de reaccionar con el halógeno. Por lo tanto, es una medida del grado de insaturación del aceite que indica la concentración de los ácidos grasos insaturados presentes en la muestra.⁶⁵

El método de determinación según la norma NTC 283:2012 se muestra en el diagrama 10. Inicialmente se diluye una porción de ensayo en cloroformo o tetracloruro de carbono según el valor esperado utilizando la tabla 4.

Tabla 4. Masa de porción de ensayo y volumen de solvente según el índice de yodo esperado.

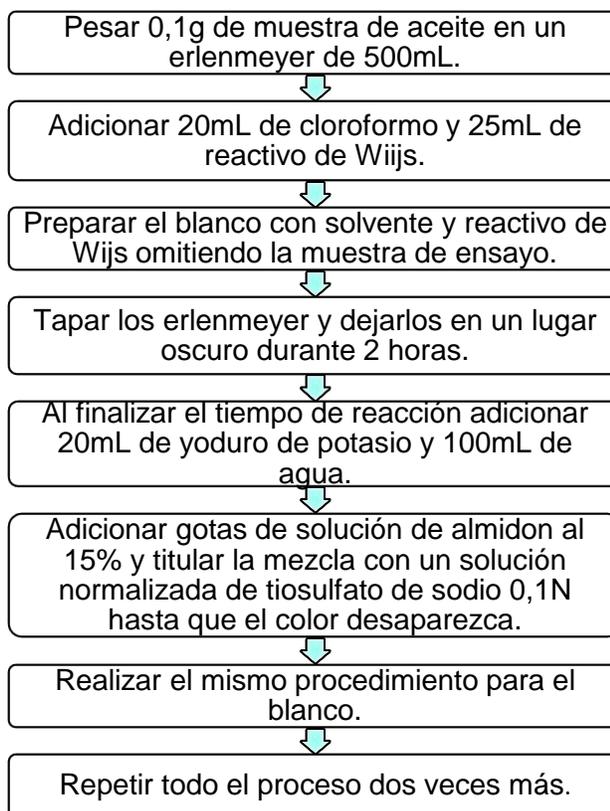
| Índice de yodo esperado, g/100g | Masa de la porción de ensayo g | Volumen de solvente ml |
|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| < 1,5 | 15,00 | 25 |
| 1,5 a 2,5 | 10,00 | 25 |
| 2,5 a 5 | 3,00 | 20 |
| 5 a 20 | 1,00 | 20 |
| 20 a 50 | 0,40 | 20 |
| 50 a 100 | 0,20 | 20 |
| 100 a 150 | 0,13 | 20 |
| 150 a 200 | 0,10 | 20 |

Nota. La masa de la muestra puede ser tal que el exceso del reactivo de Wijs este entre el 50 % al 60 % de la cantidad adicionada

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de yodo. NTC 283:2012. Bogotá, D.C: El instituto.16p.

⁶⁵ GUTIERREZ, A. Op. Cit., p.78.

Diagrama 10. Procedimiento para la determinación del índice de yodo del aceite según NTC 283:2012.



Fuente: elaboración propia.

El valor del índice de yodo se expresa como el número de gramos de yodo que va a reaccionar con los dobles enlaces en 100 gramos de aceite o grasa, y para su determinación se emplea la ecuación 6.

Ecuación 6. Cálculo del índice de yodo en aceites y grasas según NTC 283:2012.

$$VI = \frac{12,69 \times c \times (V_1 - V_2)}{m}$$

Donde:

12,69= masa molar del yodo dividido por 10 gramos de grasa.

c = es el valor numérico de la concentración de la solución del tiosulfato de sodio, en moles por litro.

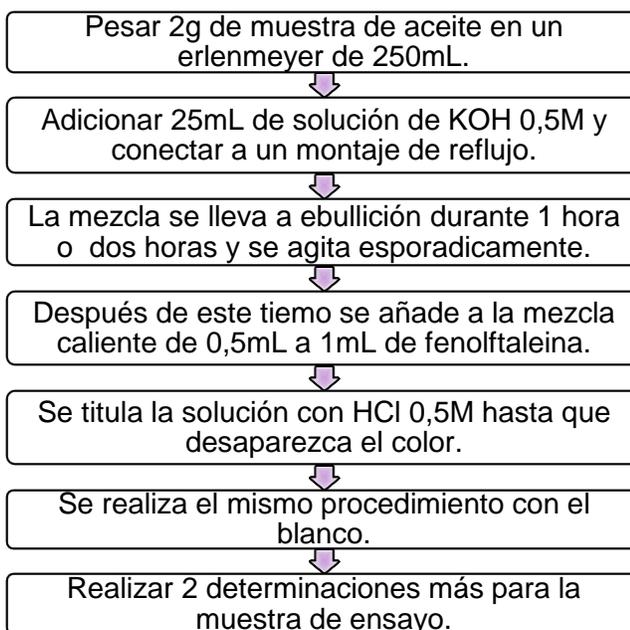
V_1 = es el valor numérico del volumen, en mililitros, de la solución de tiosulfato de sodio empleado en el blanco.

V_2 = es el valor numérico del volumen, en mililitros, de la solución de tiosulfato de sodio usado para la determinación.

m = es el valor numérico de la masa de la porción de ensayo, en gramos.

2.1.8 Índice de saponificación. El índice de saponificación se expresa como el número de miligramos de hidróxido de potasio requeridos para saponificar los ácidos grasos libres y combinados, presentes en un gramo de grasa. Este ofrece una medida del peso molecular promedio de los triglicéridos que componen el aceite o grasa. Se ha identificado que su valor es inversamente proporcional al peso molecular del aceite.⁶⁶ Para su determinación, se emplea el diagrama 11.

Diagrama 11. Procedimiento para la determinación del índice de saponificación del aceite según NTC 335:2019.



Fuente: elaboración propia.

⁶⁶ RODRÍGUEZ, J., et al. Índice de saponificación de cinco mantecas determinado mediante un micrométodo. En: Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos.2016. Vol. 1. No. 1. p. 938.

Para el cálculo del índice de saponificación se emplea la ecuación 7 que se muestra a continuación.

Ecuación 7. Cálculo del índice de saponificación en aceites y grasas según NTC 335:2019.

$$IS = \frac{(V_0 - V_1) \times c \times 56,1}{m}$$

Donde:

V_0 = es el volumen, en mililitros, de la solución volumétrica normalizada de ácido clorhídrico que se usa para el ensayo en blanco.

V_1 = es el volumen, en mililitros, de la solución volumétrica normalizada de ácido clorhídrico que se usa para la determinación.

c = es la concentración exacta, en moles por litro, de la solución volumétrica estándar de ácido clorhídrico.

m = es la masa, en gramos, de la porción de ensayo.

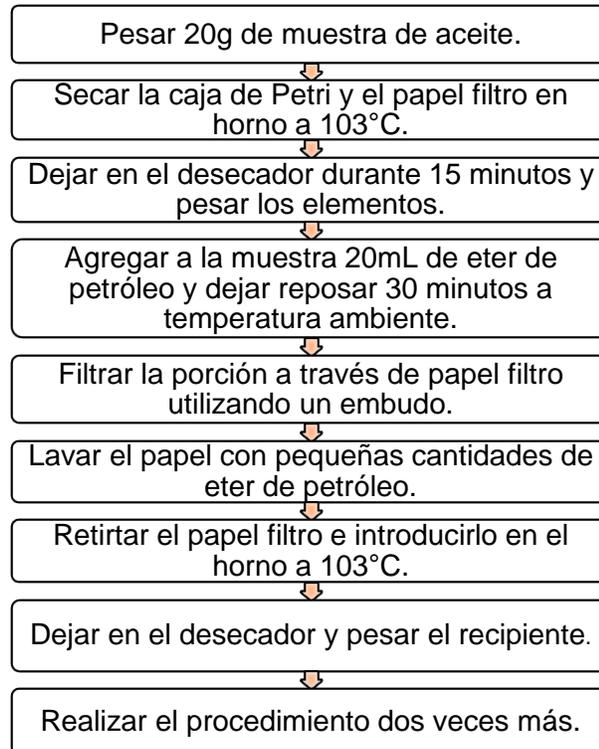
56,1= masa molar del hidróxido de potasio.

2.1.9 Impurezas insolubles. El contenido de impurezas insolubles es un indicador de calidad del aceite que hace referencia a la cantidad de suciedad y otras sustancias como: impurezas mecánicas, sustancias nitrogenadas, hidratos de carbono, minerales, resinas entre otros compuestos, que están presentes en un aceite.⁶⁷

La norma NTC 240:2011 indica que el procedimiento se realiza como se describe en el diagrama 12.

⁶⁷ FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA EL DESARROLLO DE LA NUTRICIÓN ANIMAL. Moisture, Impurities, Unsaponifiable (MIU). Impurezas Insolubles. [Sitio web]. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: http://www.fundacionfedna.org/tecnicas_de_analisis/miu-moisture-impurities-unsaponifiable-impurezas-insolubles

Diagrama 12. Procedimiento para la determinación del contenido de impurezas insolubles del aceite según NTC 240:2011.



Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta la norma, se emplea la ecuación 8 para calcular el porcentaje de impurezas.

Ecuación 8. Cálculo del contenido de impurezas insolubles en aceites y grasas según NTC 240:2011.

$$w = \frac{(m_2 - m_1)}{m_0} \times 100\%$$

Donde:

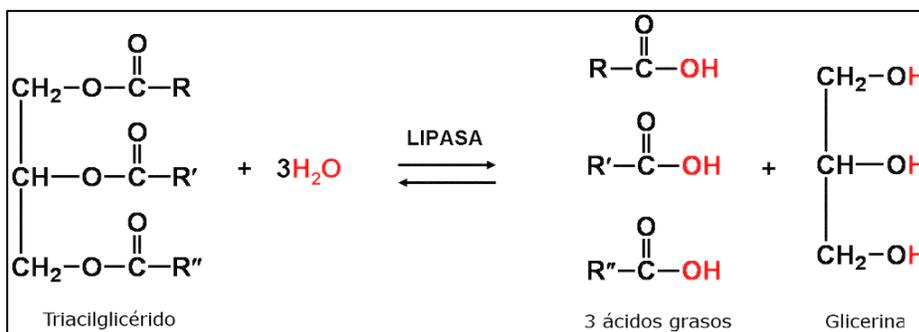
m_2 = es la masa del recipiente con su tapa y el papel filtro que contiene el residuo seco, en gramos.

m_1 = es la masa del recipiente con su tapa y el papel filtro, en gramos.

m_0 = es la masa de la porción de ensayo, en gramos.

2.1.10 Humedad y materiales volátiles. A pesar de que en los aceites y grasas el contenido de humedad que puedan llegar a tener es bajo, este es un factor muy importante que interfiere en su estabilidad, ya que favorece la reacción de hidrólisis que consiste en la reacción inversa de formación de grasas, donde se descomponen nuevamente en ácidos grasos y glicerina⁶⁸ como se muestra en la imagen 7.

Imagen 7. Reacción de hidrólisis de las grasas y aceites.



Fuente: PORTO, Alejandro. Instituto de Educación Secundaria María Casares. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: https://www.bionova.org.es/biocast/documentos/figura/figtem06/image_nest6/imagepages/image6.html

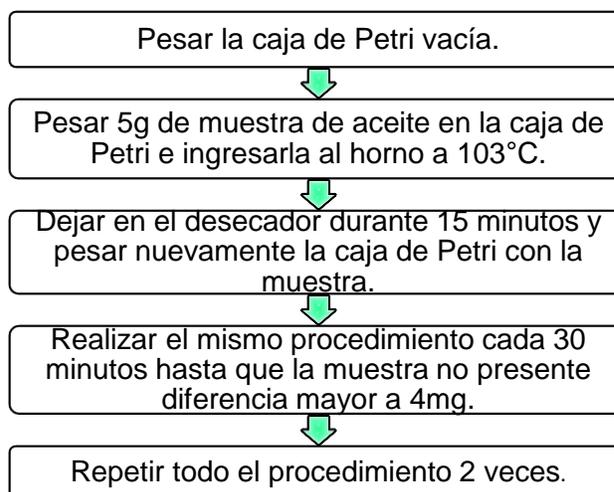
En las reacciones de hidrólisis y oxidación lipídica, se generan materiales volátiles en el aceite debido a la acción de la enzima lipoxigenasa debido a que promueve la formación de hidroperóxido que al degradarse forma compuestos volátiles como aldehídos, cetonas, ácidos y ésteres.⁶⁹

Por lo anterior, es necesaria la determinación del contenido de humedad y material volátil presente en el aceite utilizando la ecuación 9, y para esto se emplea el procedimiento de la norma NTC 287:2018 descrito en el diagrama 13 que se muestra a continuación.

⁶⁸ RIVERA, Carmen., RIVERA, Patricia., RIZO, Jahoska. Desarrollo de un método analítico alternativo para la determinación del porcentaje de humedad y materia volátil en aceite vegetal de uso comestible. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León: 2015. p.32. [Consultado 01, junio, 2020] Disponible en: <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/4224/1/229228.pdf>

⁶⁹ *Ibíd.*, p.30.

Diagrama 13. Procedimiento para la determinación del contenido de humedad y materia volátil del aceite según NTC 287:20



Fuente: elaboración propia.

Ecuación 9. Cálculo del contenido de humedad y materia volátil en aceites y grasas según NTC 287:2018.

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100\%$$

Donde:

m_1 = es la masa, en gramos, de la cápsula y la porción de ensayo antes del calentamiento.

m_2 = es la masa, en gramos, de la cápsula y el residuo después del calentamiento.

m_0 = es la masa en gramos de la cápsula o recipiente de vidrio.

Además de las pruebas mencionadas anteriormente las cuales se realizaron a nivel laboratorio, también se encuentran otras pruebas importantes en cuanto a la caracterización de aceites como: perfil de ácidos grasos, punto de fusión y punto de humo. La consecución de datos y su respectivo análisis se realizarán únicamente con base en referentes bibliográficos.

2.1.11 Perfil lipídico. Es importante tener conocimiento del perfil lipídico o perfil de ácidos grasos de un aceite, debido a que con estos valores podemos tener conocimiento no solamente de la cantidad de ácido grasos que posee el aceite, sino

que además de esto podemos determinar específicamente cuales se encuentran en el aceite y la proporción de cada uno de estos.

Los ácidos grasos son: no esenciales, que pueden ser sintetizados por el organismo y esenciales que deben ser aportados por la dieta. Los esenciales corresponden al ácido graso omega-6 (linoleico) y el ácido graso omega-3 (alfa-linolénico)⁷⁰, principales ácidos grasos que posee el aceite de sacha inchi, por lo que resulta importante su cuantificación.

Actualmente la cromatografía de gases es el método más utilizado para evaluar el perfil de ácidos grasos en muestras de grasas y aceites. Este análisis no es posible sin llevar a cabo la metil-esterificación de los ácidos grasos libres de manera previa.⁷¹

2.1.12 Punto de humo. El punto de humo es la temperatura límite a la cual se puede calentar un aceite antes de que se forme “humo” y pierda sus propiedades. La descomposición también implica decoloración, el aceite se torna de color oscuro, también su textura se vuelve más viscosa y emite mal olor. Esto se debe a la formación de sustancias llamadas acroleínas, siendo potencialmente cancerígenas.⁷²

Para determinar este valor se debe tener en cuenta la NTC 5478:2007 la cual especifica un método para determinar el punto de humo, chispa e ignición de grasas y aceites comestibles, vegetales y animales por el método de Cleveland de copa abierta.

2.1.13 Punto de fusión. Es importante conocer el punto de fusión del aceite, debido a que esta es una propiedad que indica la temperatura a la cual el aceite o grasa pasa de un estado sólido a líquido, lo cual nos ayuda a establecer la temperatura a la cual podemos trabajar con el aceite en diferentes procesos según el producto que se quiera obtener. El punto de fusión de los triglicéridos aumenta al aumentar el peso molecular de los ácidos grasos que forman la grasa, y se solidifica más rápidamente a medida que disminuye la insaturación.⁷³ Para poder determinar el punto de fusión del aceite se debe seguir la NTC 213:2013 Grasas y aceites

⁷⁰ FEDEPALMA. Perfil de ácidos grasos de los diferentes aceites más usados en la preparación de los alimentos y recomendaciones de consumo. [Sitio web]. [Consultado 03, junio, 2020]. Disponible en: <https://lapalmaesvida.com/salud/perfil-de-acidos-grasos-de-los-diferentes-aceites-mas-usados-en-la-preparacion-de-los-alimentos-y-recomendaciones-de-consumo/>

⁷¹ HERRERA, Mayra, et.al. Metodología para la extracción, identificación y cuantificación de ácidos grasos en la dieta y leche de cabras. [En línea]. [Consultado el 3, junio, 2020] Disponible en: <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/metoAcidosGLEche.pdf>

⁷² STAIR, R. Guía de aceites comestibles, composición, aplicación, nutrición y más. Memphis: Asociación Nacional de Productos de Semillas de Algodón de los E.U.A. Citado por: HURTADO, Zully. Op. Cit., p.48.

⁷³ MEDINA, Gilma. Aceites y grasas comestibles. [En línea]. [Consultado 3, junio, 2020]. Disponible en: http://aprendeenlinea.udea.edu.co/lms/moodle/file.php/424/Gilma_Medina/Grasasyaceites/Documento_Grasas_y_aceites.pdf

vegetales y animales. Determinación del punto de fusión capilar abierto.

2.2 RESULTADOS PRUEBAS DE CARATERIZACIÓN

En la tabla 5 se pueden observar los resultados de la caracterización fisicoquímica del aceite virgen de sacha inchi obtenidos en el laboratorio. Para cada prueba se realizaron triplicados y de esta manera poder reducir el error tanto humano como sistemático que pudiese ocurrir. Con estos resultados se empleó la media aritmética para cada prueba obteniendo el valor promedio final.

Tabla 5. Resultados pruebas de caracterización fisicoquímica del aceite.

| Prueba | Réplica 1 | Réplica 2 | Réplica 3 | Promedio aritmético |
|---|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| pH a 17°C | 6,59 | 7,02 | 7,27 | 6,96 |
| Densidad (g/mL) a 16°C | 0,91 | 0,92 | 0,92 | 0,92 |
| Índice de Acidez (mg KOH/g aceite) | 0,30 | 0,32 | 0,31 | 0,31 |
| Acidez (% expresado como ácido oleico) | 0,073 | 0,078 | 0,081 | 0,077 |
| Índice de refracción a 16°C | 1,4819 | 1,4805 | 1,4825 | 1,4816 |
| Índice de peróxidos (meq O ₂ /kg aceite) | 3,07 | 2,98 | 3,31 | 3,12 |
| Índice de yodo (g I ₂ /100 g aceite) | 196,67 | 197,92 | 197,45 | 197,35 |
| Índice de saponificación (mg KOH/g aceite) | 193,27 | 193,45 | 194,65 | 193,79 |
| Impurezas insolubles (%) | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 |
| Humedad y materiales volátiles (%) | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 6, los valores experimentales se encuentran dentro de los valores reportados en la Resolución 2154 de 2012 dada en Bogotá, la cual establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir los aceites y grasas de origen vegetal o animal que se procesen, envasen, almacenen, transporten, exporten, importen y/o comercialicen en el país, destinados para el consumo humano y se dictan otras disposiciones.⁷⁴

Tabla 6. Comparación de resultados experimentales con las características de calidad de aceites vegetales según la Resolución 2154 de 2012 de Bogotá.

| Prueba | Resultado experimental | Dato teórico máximo |
|---|-------------------------------|----------------------------|
| Acidez (% expresado como ácido oleico) | 0,077 | 0,10 |
| Índice de peróxidos (meq O ₂ /kg aceite) | 3,12 | ≤ 20 |
| Impurezas insolubles (%) | 0,015 | 0,05 |
| Humedad y materiales volátiles (%) | 0,10 | 0,2 |

Fuente: elaboración propia.

De igual manera, se consultó la Norma Técnica Peruana NTP 151.400:2014 que indica los requisitos que debe tener el aceite de sacha inchi, debido a que actualmente no se dispone de una norma técnica colombiana específica para este aceite. Los resultados se pueden observar en la tabla 7.

⁷⁴ MINISTERIO DE SALUD. Resolución 2154 (08, agosto, 2012). Op. Cit., p.7.

Tabla 7. Comparación de resultados experimentales con los requisitos del aceite de sachá inchi según la NTP 151.400:2014.

| Prueba | Resultado experimental | Dato teórico | |
|---|------------------------|--------------|--------|
| | | Mínimo | Máximo |
| pH | 6,96 | (*) | (*) |
| Densidad (g/mL) | 0,92 | 0,926 | 0,931 |
| Índice de acidez (mg KOH/g aceite) | 0,31 | (*) | (*) |
| Índice de refracción | 1,4816 | 1,478 | 1,481 |
| Índice de yodo (I ₂ /100 g aceite) | 197,35 | 183 | 199 |
| Índice de saponificación (mg KOH /g aceite) | 193,79 | 192 | 196 |

Fuente: elaboración propia.

(*) Estos datos no son proporcionados por la NTP 151.400:2014.

Los valores para las pruebas de caracterización correspondientes al perfil de ácidos grasos, punto de humo y punto de fusión que se encuentran en la tabla 8 y 9, fueron obtenidos a partir de referentes bibliográficos.

En la tabla 8 se muestra el perfil de ácidos del aceite de sachá inchi realizado en diferentes investigaciones. Generalmente para determinar el perfil lipídico se emplea la técnica por cromatografía de gases la cual permite determinar cualitativa y cuantitativamente los componentes de la mezcla orgánica. En cuanto al análisis cualitativo se emplea el tiempo de retención o volumen de retención, mientras que para cuantificar los componentes se debe medir la altura de cada pico con los instrumentos adecuados para obtener la concentración de cada analito.⁷⁵

⁷⁵ HURTADO, Zully. Op. Cit., p.27.

Tabla 8. Perfil de ácidos grasos del aceite de sacha inchi.

| Ácido Graso (%) | GUTIERREZ, et al. ⁷⁶ | HURTADO ⁷⁷ | CASTAÑO O et al. ⁷⁸ | MANCO ⁷⁹ | AYALA ⁸⁰ |
|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|
| Mirístico (C14:0) | 0,10 | --- | --- | 1,24 | 0,02 |
| Palmítico (C16:0) | 4,40 | 4,20 | 3,60 | 4,50 | 4,26 |
| Palmitoleico (C16:1) | --- | --- | --- | --- | 0,05 |
| Margárico (C17:0) | --- | 0,091 | --- | --- | 0,08 |
| Estearico (C18:0) | 2,40 | 2,89 | 2,90 | 3,20 | 3,07 |
| Oleico ω 9 (C18:1) | 9,10 | 8,45 | 8,50 | 9,60 | 9,98 |
| Linoleico ω 6 (C18:2) | 33,40 | 35,30 | 33,90 | 36,99 | 33,91 |
| Linolénico ω 3 (C18:3) | 50,80 | 47,70 | 50,20 | 42,20 | 47,12 |
| Σ AGI | 93,30 | 91,45 | 92,60 | 88,79 | 91,06 |
| Σ AGS | 6,80 | 7,10 | 6,50 | 8,94 | 7,43 |

Fuente: elaboración propia.

⁷⁶ GUTIERREZ, Luis., ROSADA, Lina., JIMÉNEZ, Álvaro. Op.Cit., p. 80.

⁷⁷ HURTADO, Zully. Op. Cit., p.49.

⁷⁸ CASTAÑO, Diego, et al. Composición de ácidos grasos de sacha inchi (*Plukenetia volúbilis linneo*) y su relación con la bioactividad del vegetal. En: Revista Chilena de Nutrición. 2012. Vol.39. No.1. p.50.

⁷⁹ MANCO, E. 2003. Situación y avances del cultivo de sacha inchi en el Perú. PRONIRGEB-INIEA. E. E. "El Provenir", Juan Guerra-Tarrapoto. p.50. Citado por: AYALA, Guillermo. Op. Cit., p.16.

⁸⁰ AYALA, Guillermo. Op. Cit., p.48.

Tabla 9. Valores de otras pruebas de caracterización del aceite de sachá inchi.

| Prueba | Valor | |
|----------------------|------------------------|------------------|
| Punto de Humo (°C) | 215± 2 ⁸¹ | |
| Punto de Fusión (°C) | -9± 0,02 ⁸² | -5 ⁸³ |

Fuente: elaboración propia.

2.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN

- **pH**

El valor de pH equivalente a 6,96 es una medida indirecta del contenido de ácidos grasos libres presentes en la muestra de aceite, el cual indica que tiene un contenido bajo de este tipo de ácidos grasos al tener un valor cercano a 7, por lo que se puede asumir que la muestra no se encuentra degradada por la oxidación.

- **Densidad**

La densidad del aceite de sachá inchi calculada con los resultados obtenidos en el laboratorio arrojó un valor de 0,91 g/mL. Debido a que la composición de ácidos grasos del aceite de sachá inchi en su mayoría corresponden al omega-3 y omega-6 considerados ácidos grasos de cadena larga, el valor esperado de la densidad debe ser alto. Realizando una comparación con la densidad del aceite de palma reportado por FEDEPALMA la cual equivale a 0,89g/mL⁸⁴, este aceite presenta un valor menor de densidad ya que tiene altas cantidades de ácido palmítico el cual tiene 16 carbonos en su cadena, frente a los 18 carbonos que tienen el omega-3 y omega-6 del sachá inchi y por esta razón su valor de densidad es menor.

- **Acidez**

El valor de acidez (% ácido oleico) del aceite de sachá inchi obtenido a nivel experimental fue de 0,077 teniendo como valor máximo permitido según la Resolución 2154 de 2012 un valor de 0,10%. Este dato nos indica el contenido en porcentaje de los ácidos grasos libres presentes en un aceite. Al obtener un valor

⁸¹ HURTADO, Zully. Op. Cit., p.46

⁸² SANTOS, Sandra. Estudio de la estabilidad del aceite de Sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) a diferentes condiciones de inhibición oxidativa. Trabajo de grado. Universidad Técnica de Ambato. Ecuador: 2018. [Consultado 06, junio, 2020]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/28374/1/AL%20679.pdf>

⁸³ GUTIERREZ, Luis., ROSADA, Lina., JIMÉNEZ, Álvaro. Op. Cit., p.82.

⁸⁴ RINCÓN, Sandra., MARTÍNEZ, Daniel. Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. En: Revista PALMAS. 2009. Vol. 30. No. 2. p.17.

bajo frente al de referencia, indica que el aceite es de calidad, por lo que no será susceptible a un alto grado de oxidación.

- **Índice de refracción**

En cuanto al índice de refracción del aceite en estudio, presentó un valor de 1,4816, resultado que se encuentra dentro del rango permitido. Este índice está relacionado con las insaturaciones que posee el aceite y a diferencia de otros aceites como el de oliva, maní y girasol los cuales poseen un índice de refracción de 1,4672; 1,4698 y 1,4610 respectivamente, nos indica que es un aceite altamente insaturado y que existe gran cantidad de cadenas de ácidos grasos largos.⁸⁵

- **Índice de saponificación**

Por otra parte, el índice de saponificación es una medida relacionada con el peso molecular o tamaño medio de las cadenas de los ácidos grasos constituyentes de un aceite⁸⁶. El valor obtenido para el aceite de sachá inchi fue de 193,79, valor que se encuentra dentro de los parámetros permitidos. Los aceites que poseen cadenas de ácidos grasos más largas tienen un menor valor del índice de saponificación por lo tanto se consume menos cantidad de KOH, mientras que los ácidos grasos de cadena corta consumen más álcali.⁸⁷

- **Índice de peróxidos**

El índice de peróxidos es un índice que determina el deterioro o rancidez de los aceites debido a que se mide como los mili-equivalentes de oxígeno por kilogramo de aceite, es decir, la oxidación que presenta el aceite. Entre más alto sea este valor indicará un nivel elevado de rancidez del aceite y por tal razón se verá afectada su calidad. El valor obtenido para el aceite de sachá inchi fue de 3,12. Según la resolución 2154 de 2012 el valor de peróxidos máximo permitidos para aceites prensados en frío y vírgenes debe ser ≤ 20 , lo cual quiere decir que el aceite virgen de sachá inchi posee poca oxidación y rancidez, por lo tanto, se podría almacenar un mayor tiempo.

⁸⁵ HURTADO, Zully. Op. Cit., p.47.

⁸⁶ HERNANDEZ, María. Determinación del índice de saponificación en aceite de maíz usando una lipasa de procedencia nacional. [En línea]. Trabajo Especial de Grado Licenciatura en Química. Universidad de los Andes. Mérida: 2017. [Consultado 06, junio, 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Cristobal_Larez_Velasquez/publication/320622547_Determinacion_del_indice_de_saponificacion_en_aceite_de_maiz_usando_una_lipasa_de_procedencia_nacional/links/59f1cd97a6fdcc1dc7b92469/Determinacion-del-indice-de-saponificacion-en-aceite-de-maiz-usando-una-lipasa-de-procedencia-nacional.pdf

⁸⁷ ARIAS. Martha, BARRA, Diana. Saponificación artesanal de aceites de cocina usados, provenientes del municipio de Charalá. Documentos De Trabajo ECPMA. 2018. Vol. 2.No.1.

- **Índice de yodo**

En cuanto al índice de yodo se obtuvo un valor de 197,35, el cual estuvo cercano al máximo valor reportado por la NTP correspondiente a 199. Esto se debe a que el índice de yodo indica la concentración de los ácidos grasos insaturados presentes en el aceite y como se mencionó en la sección 1.3.1 el aceite de sachá inchi se caracteriza por tener un alto contenido de AGI. Eso se puede corroborar con los referentes bibliográficos acerca del perfil lipídico del aceite de sachá inchi que se encuentran en la tabla 8, donde la sumatoria de AGI del aceite obtuvo valores entre el 84% y el 93% en comparación con los bajos porcentajes reportados en cuanto a AGS.

- **Impurezas insolubles**

Es importante determinar la cantidad impurezas insolubles que contiene el aceite, debido a que estas son las impurezas mecánicas, sustancias nitrogenadas, hidratos de carbono, minerales o resinas que pueda contener el aceite y genere un mal sabor o aspecto. Por tal razón, un valor bajo hace referencia a la calidad del aceite mientras que un valor elevado disminuye la calidad de este. Para el aceite estudiado se obtuvo un valor de 0,01493 con un máximo permitido 0,05; lo cual quiere decir que el aceite virgen de sachá inchi posee bajo contenido impurezas y se encuentra dentro de los parámetros establecidos en la Resolución 2154 de 2012, por lo que se determina que el aceite es de calidad.

- **Humedad y materiales volátiles**

En cuanto a la humedad y materiales volátiles, a pesar de ser baja en los aceites es importante tener en cuenta este parámetro. Para el aceite virgen de sachá inchi el valor de humedad y materiales volátiles fue de 0,10, dato que se encuentra entre al máximo permitido el cual es de 0,2. Esto quiere decir que este aceite al poseer poca humedad va a ser más estable debido a que no favorecerá la reacción de hidrólisis.

- **Perfil de ácidos grasos**

En el perfil de ácidos grasos del aceite de sachá inchi se puede evidenciar que el aceite en su mayoría contiene ácidos grasos omega-3 y omega-6, lo que le confiere un potencial para el beneficio en la salud de las personas que lo consuman. Adicional a esto, se pudo evidenciar que el aceite posee bajas cantidades de AGS, por lo que puede considerarse un aceite saludable que reduce el riesgo de tener niveles de colesterol elevados en la sangre.

- **Punto de humo**

El punto de humo del aceite de sacha inchi reportado en la bibliografía equivale a 215°C. Esto indica que el aceite puede ser utilizado para frituras ya que la máxima temperatura recomendada para freír debe ser menor a 180°C, para que no haya afectaciones en el sabor de los alimentos.⁸⁸ Por lo anterior, se puede tener un buen control de la temperatura del aceite de sacha inchi, teniendo en cuenta que a 215°C el aceite comienza a descomponerse.

- **Punto de fusión**

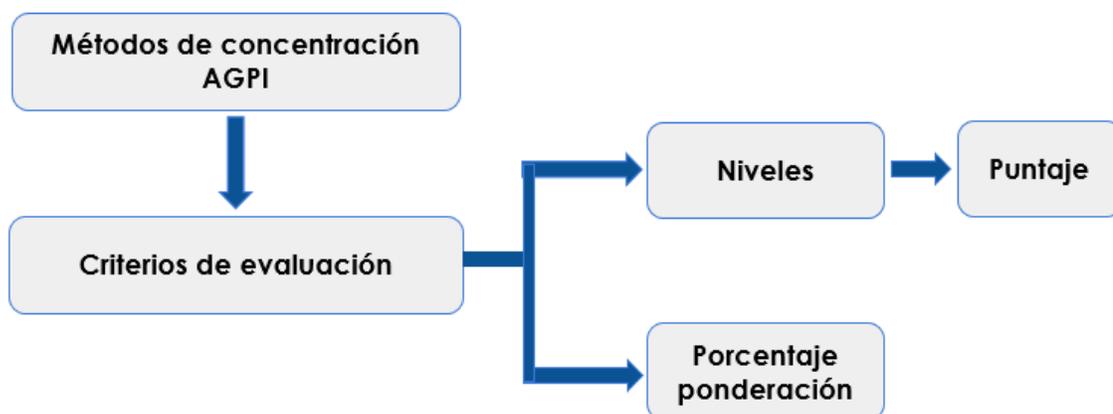
Debido a que la mayoría de los ácidos grasos que posee el aceite de sacha inchi son del tipo AGI, el punto de fusión según las fuentes consultadas es un valor bajo equivalente entre -9°C y -5°C. Esta es una propiedad de alto interés en los compuestos químicos ya que juega un papel importante en la determinación de las distintas aplicaciones alimentarias que pueda tener según su procesamiento.

⁸⁸ LA VANGUARDIA. ¿A qué temperatura hay que calentar el aceite para hacer una buena fritura? [Sitio web]. [Consultado 06, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/comer/recetas/20161125/412112428990/temperatura-aceite-freir-180-c.html>

3. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CONCENTRACIÓN DE AGPI

En la actualidad, existen diversos métodos para la concentración de ácidos grasos poliinsaturados, los cuales permiten que se pueda llevar a cabo diversos procesos tanto a nivel laboratorio como a nivel industrial. Cada uno de estos métodos tiene diferentes principios de funcionamiento que incluyen variables y equipos, lo cual conlleva a que dependiendo de diferentes criterios que se quieran evaluar, se pueda seleccionar entre los distintos métodos existentes según lo que se quiera lograr en el proceso o en alguna investigación específicamente. Dicho lo anterior, en este capítulo se mencionarán dichos métodos de concentración de AGPI y a su vez el principio y estudios realizados con cada uno de ellos. Teniendo en cuenta el diagrama 14 se identifica la ruta para la elaboración de la matriz de decisión con el fin de establecer el método más favorable para concentrar el aceite virgen de sacha inchi. En la matriz se evalúan los métodos de concentración de AGPI de acuerdo con determinados criterios que se serán descritos en el transcurso del capítulo.

Diagrama 14. Ruta de elaboración de la matriz de decisión.



Fuente: elaboración propia.

3.1 MÉTODOS DE CONCENTRACIÓN DE AGPI

Se han propuesto varias técnicas para la concentración de AGPI, en especial de omega-3, entre las que se encuentran: concentración por métodos enzimáticos, fraccionamiento por fluidos supercríticos, hibernación (más conocido como cristalización fraccionada), fraccionamiento por métodos cromatográficos, formación de complejos con urea y destilación molecular⁸⁹.

3.1.1 Métodos enzimáticos. La síntesis de triglicéridos se puede llevar a cabo por las reacciones de hidrólisis del aceite con el fin de obtener ácidos grasos omega-3

⁸⁹ BONILLA, Jeimmy., HOYOS, José. Op. Cit., p. 622.

libres. En los procesos de modificación de aceites vegetales, las enzimas que se emplean son de tipo lipasas, estas son catalizadores naturales de uso industrial, capaces de sintetizar diferentes compuestos. Tienen múltiples ventajas como: tener una alta eficiencia catalítica, usan recursos renovables, elevan la especificidad del proceso, actúan bajo condiciones normales de reacción y tienen gran aceptabilidad medioambiental.⁹⁰

Según una investigación realizada para la obtención de omega-3 mediante hidrólisis enzimática de aceite de pescado, el proceso se realiza de la siguiente forma:

La hidrólisis de los lípidos ocurre naturalmente en el duodeno por la acción de las lipasas digestivas. Este proceso implica principalmente la rotura del enlace éster de los triglicéridos a cargo de las lipasas, con la consiguiente acumulación de ácidos grasos libres, así como de monoglicéridos y diglicéridos o glicerol, si la hidrólisis afecta a las tres posiciones de esterificación del mismo. Numerosos artículos relatan cómo es posible obtener un buen rendimiento de hidrólisis de aceites ricos en omega-3 en el laboratorio mediante la utilización de lipasas de forma libre, o inmovilizadas. La hidrólisis tiene lugar en una interfase lípido-agua, es decir, sólo actúan sobre sustratos insolubles. Como todas las esterasas, rompen los enlaces éster mediante la adición de agua.⁹¹

Sin embargo, este método posee la dificultad de consecución de las enzimas y del elevado costo es estas. De igual manera los tiempos de reacción necesarios para realizar este método son elevados. Estos se evidencian en un estudio presentado en un artículo donde se maximiza la concentración de omega-3 (EPA y DHA) en el proceso de acidólisis enzimática del aceite de canola y concentrado de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga (LCPUFA) en condiciones de CO₂ supercrítico, donde logran incrementar la cantidad de EPA y DHA (ácidos grasos esenciales poliinsaturados de la serie omega-3) con tiempos de reacción de 24 horas con una concentración de enzima de 7,63% y 7,62% respectivamente para cada ácido graso del omega-3⁹², esto se puede observar en la tabla 10.

⁹⁰ MORENO, Sonia. Ingeniería de la síntesis de triglicéridos de ácidos omega-3 y de antioxidantes protectores catalizados por lipasas. [En línea]. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid: 2015. 125p. [Consultado 05, junio, 2020]. Disponible en: https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/669697/moreno_perez_sonia.pdf?sequence=1&isAllowed=y

⁹¹ *Ibíd.*, p. 22.

⁹² CEDANO, José., RODRÍGUEZ, Alicia., SICHE, Raúl. Maximización del contenido de Omega-3 (EPA y DHA) en el proceso de acidólisis enzimática de aceite de canola y concentrado de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga (AGPICL), en condiciones de CO₂ supercrítico. En: *Scientia Agropecuaria*. 2015. Vol. 6. No. 4. p 319. ISSN 2306-6741

Tabla 10. Optimización de respuesta múltiple para el contenido de EPA y DHA.

| Optimización individual | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|---------------------|
| Variable respuesta | Variables independientes | | | | | Punto estacionario | Valor óptimo |
| | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | | |
| Y1: EPA | 90,0 | 59,18 | 200,00 | 24,0 | 7,63 | Máximo | 5,04 |
| Y2: DHA | 90,0 | 55,74 | 200,00 | 23,99 | 7,62 | Máximo | 12,12 |

X1: LCPUFA/Canola (%), X2: Temperatura (°C), X3: Presión (bar), X4: Tiempo (h), X5: Enzima (%)

Fuente: elaboración propia con base en: CEDANO, José., RODRÍGUEZ, Alicia., SICHE, Raúl. Maximización del contenido de Omega-3 (EPA y DHA) en el proceso de acidólisis enzimática de aceite de canola y concentrado de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga (AGPICL), en condiciones de CO₂ supercrítico. En: Scientia Agropecuaria. 2015. Vol. 6. No. 4. p 319. ISSN 2306-6741

3.1.2 Fraccionamiento por fluidos supercríticos. El fraccionamiento de aceite de pescado con dióxido de carbono supercrítico ha sido ampliamente estudiado para la obtención de omega-3, debido a sus múltiples beneficios para la salud. Generalmente se utiliza la destilación al vacío para los procesos de concentración, sin embargo, para esto se requieren altas temperaturas lo que podría provocar la descomposición de los ácidos grasos del aceite.⁹³

Rubio⁹⁴ menciona en su investigación el uso de fluidos supercríticos para concentrar el omega-3 del aceite de pescado. Para esto, inicialmente se realiza la extracción de aceite de pescado utilizando dióxido de carbono en condiciones supercríticas, obteniendo una fracción ligeramente concentrada de omega-3 a la salida del extractor del fraccionamiento del aceite. Posterior a esto, en la segunda etapa se realiza una reacción enzimática en medio dióxido de carbono supercrítico de la fracción de aceite más rica en omega-3 obtenida en la primera etapa, lo que permite obtener un concentrado más rico; y para la separación de los productos de esta etapa de reacción se realiza un fraccionamiento por diferencia de solubilidades de los distintos productos en dióxido de carbono.

De igual manera en un estudio se realizó el fraccionamiento continuo por lotes de aceite de pescado por fluidos supercríticos con el objetivo de concentrar los ésteres etílicos de ácidos grasos de la serie omega-3 y alcanzar altos niveles de sus ácidos grasos principales correspondientes al DHA y EPA. Para esto emplearon métodos de cromatografía de gases para establecer las condiciones de operación, utilizando un equipo que contaba con una columna de tres etapas. El dióxido de carbono se

⁹³ VELASCO, Reinaldo., VILLADA, Héctor., CARRERA, Jorge. Aplicaciones de los fluidos supercríticos en la agroindustria. Universidad del Cauca. Popayán: 2007. Vol. 18, No.1. p 53-65.

⁹⁴ RUBIO, Nuria. Supercritical fluid technology for extraction, concentration & formulation of omega-3 fish oils. A novel strategy for valorization of fish by-products. [En línea]. Tesis doctoral. Universidad de Burgos. Burgos, España: 2011. p.5. [Consultado 05, junio, 2020]. Disponible en: https://riubu.ubu.es/bitstream/handle/10259/153/Rubio_Rodr%c3%adguez.pdf?sequence=1&isAllowed=y

alimentó por la parte inferior de la columna y se realizaron corridas de 2 horas utilizando presiones entre los 140-300 bar y diferentes flujos de dióxido de carbono líquido manteniendo una temperatura en las diferentes secciones de la columna de 40°C, 50°C y 60°C respectivamente. Para la recuperación de los ésteres etílicos de ácidos grasos se empleó un separador cilíndrico seguido de otros dos separadores configurados a 30°C y 60bar. Finalmente, según intervalos de tiempo establecidos en el estudio se recogieron las muestras del fraccionamiento para determinar su perfil de ácidos grasos por medio de cromatografía.⁹⁵

A pesar de que este tipo de tecnología tiene un impacto ambiental insignificante y en el producto final hay ausencia de solvente, la principal desventaja de trabajar con fluidos supercríticos es que se deben emplear presiones muy elevadas que requieren equipos especiales que soporten las altas presiones, lo que incrementaría en costos de inversión de equipos y de consumo energético.⁹⁶

3.1.3 Cristalización fraccionada. La cristalización fraccionada de aceites es un proceso que se conoce comúnmente como winterización, fraccionamiento o hibernación. Este se puede llevar a cabo por 3 métodos distintos que corresponden a: el método convencional, que consiste en una cristalización y separación por filtros, el método de cristalización con agua que contiene un agente humectante que generalmente es jabón y la cristalización con el uso de solventes.⁹⁷ En el trabajo propuesto se hablará sobre cristalización fraccionada del aceite por el método convencional, ya que es el único que implica métodos físicos, lo cual permite conservar la naturaleza del aceite y evitar el uso de solventes y reactivos. Sin embargo, el tiempo de procesamiento generalmente oscila entre 12-24 horas.⁹⁸

El método de cristalización fraccionada convencional es un proceso físico reversible que consiste en la separación termo-mecánica en dos etapas de los ácidos grasos del aceite por punto de fusión. La primera etapa del proceso corresponde a la cristalización donde se hace un enfriamiento gradual del aceite bajo unas condiciones específicas según el tipo de aceite, en la cual se obtienen dos fracciones: una con ácidos grasos de alto punto de fusión y otra con ácidos grasos de bajo punto de fusión.⁹⁹ Bonilla¹⁰⁰ y Hoyos mencionan en su artículo que “los ácidos grasos saturados y monoinsaturados, que poseen una temperatura de fusión más alta, cristalizan y pueden ser separados por filtración, mientras que los AGPI

⁹⁵ PERRETI, G. et al. Supercritical carbon dioxide fractionation of fish oil fatty acid ethyl esters. En: Journal of Supercritical Fluids. 2007. Vol.40. No.3 p.350.

⁹⁶CARDONA, Carlos., ORREGO, Carlos. Avances investigativos en la producción de biocombustibles. Universidad Nacional de Colombia. Parte 3. p.72. ISBN 978-958-44-5261-0

⁹⁷ LEIBOVITZ, Z., RUCKENSTEIN, C. Winterization of sunflower. En: AOCS Press.1984. Vol.61. No.5. p. 870-872.

⁹⁸ *Ibíd.*,p.871.

⁹⁹ HENDRIX, Marc. Fraccionamiento en seco del aceite y de los ácidos grasos del palmiste para los productos de alto valor agregado. En: Revista Palmas. 2010. Vol. 31. No. Especial. p.317.

¹⁰⁰ BONILLA, Jeimmy., HOYOS, José. Op. Cit., p.633.

permanecen en forma líquida en el aceite”. Por lo tanto, la segunda etapa del proceso corresponde a la filtración donde los cristales formados se separan de la fracción líquida obtenida.

La etapa de cristalización consiste realizar un enfriamiento controlado de una fase homogénea líquida que corresponde al aceite, con el objetivo de que se formen partículas sólidas denominadas cristales.¹⁰¹ Dichos cristales son un sistema de átomos altamente ordenados en redes tridimensionales, donde las celdas son unidades repetitivas que constituyen la estructura completa de un determinado cristal, mientras que la subcelda es la unidad real más pequeña de una celda que se define como el modo de empaquetamiento de las cadenas de los triglicéridos de la grasa.¹⁰²

Una vez se alcance la temperatura del proceso para iniciar la cristalización, los cristales que se formen van a corresponder a los ácidos grasos de mayor punto de fusión del aceite, el cual aumenta con la extensión de la longitud de la cadena de los ácidos grasos y disminuye con el aumento del número de dobles enlaces de la molécula.¹⁰³

La cristalización fraccionada se ve afectada por diferentes parámetros a nivel molecular como: el enfriamiento hasta alcanzar la sobresaturación, los tipos de nucleación que se puedan presentar, el crecimiento del cristal bajo ciertas condiciones de temperatura y el polimorfismo de las grasas. Estos parámetros son fundamentales en el proceso para que el aceite cristalice de manera adecuada.¹⁰⁴

- **Sobresaturación**

Inicialmente para la formación de cristales a partir de un sistema líquido, es necesario alcanzar un estado de sobresaturación que será la fuerza impulsora para las etapas de nucleación y crecimiento de los cristales.¹⁰⁵ Esto se alcanza cuando la matriz líquida del aceite se encuentra por debajo de su punto de fusión por lo que

¹⁰¹ UNIVERSIDAD NACIONAL DE MISIONES. Cristalización. . [En línea]. p.6. [Consultado 05, junio, 2020]. Disponible en: <http://www.aulavirtual-exactas.dyndns.org/claroline/backends/download.php?url=L0NyaXN0YWxpemFjafNuL0NyaXN0YWxpemFjafNuLnBkZg%3D%3D&cidReset=true&cidReq=OPTRCA>

¹⁰² FONTENELE, María, et al. Advances in lipids crystallization technology. En: INTECH. 2015. Capítulo 3. p.106.

¹⁰³ KNOTHE, Gerhard., DUNN, Robert. A Comprehensive Evaluation of the Melting Points of Fatty Acids and Esters Determined by Differential Scanning Calorimetry. En: Revista AOCS. 2009. p.853.

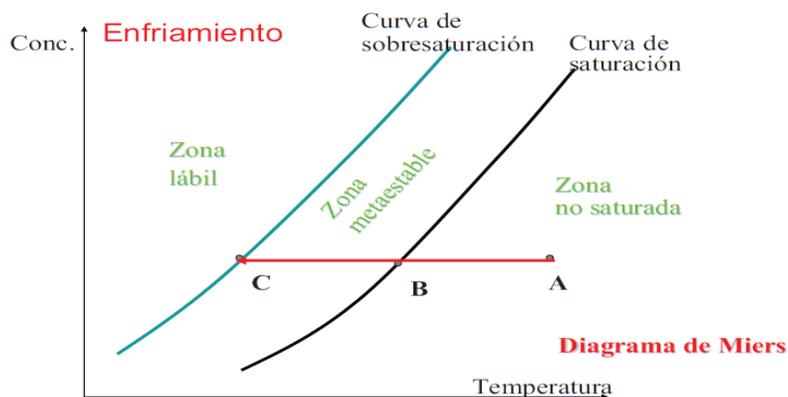
¹⁰⁴ MÉNDEZ, María. Cuantificación y caracterización del contenido de sólidos y estabilidad térmica de diferentes tipos de oleínas de palma africana (*Elaeisguineensis*) y mezclas con aceite de soya (*Glycinemax*). [En línea]. Trabajo de grado. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala: 2014. p.15. [Consultado 05, junio, 2020]. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1465_Q.pdf

¹⁰⁵ FONTENELE, María., Et al. Op. Cit. Capítulo 3.1.1. p.108.

se vuelve sobresaturada en los triglicéridos que tengan mayor punto de fusión, lo que ocasiona que estos cristalicen para disminuir su potencial químico.¹⁰⁶

En la gráfica 3 se puede observar el diagrama de Miers, donde se distinguen las curvas de saturación y sobresaturación. La saturación es un estado del equilibrio termodinámico cuando se alcanza el equilibrio entre la mezcla y los cristales formados, por lo tanto, la curva de saturación o solubilidad representa la composición de la mezcla a diferentes condiciones de temperatura, mientras que la curva de sobresaturación indica la zona donde la formación de cristales ocurre de manera espontánea.¹⁰⁷ Adicional a esto, en el diagrama se pueden observar tres zonas que puede alcanzar la mezcla durante el enfriamiento: la zona no saturada por debajo de la curva de saturación, donde no tendrá lugar la nucleación o formación de los primeros cristales debido a que no hay sobresaturación; la zona metaestable que se encuentra entre ambas curvas donde la cristalización es posible pero no ocurre de manera espontánea sin ayuda como agitar o sembrar cristales y la zona lábil donde la cristalización ocurrirá espontáneamente.¹⁰⁸

Gráfica 3. Diagrama de solubilidad y sobresaturación de Miers.



Fuente: LECHUGA, Silvia., PAREJA DEL MORAL, Andrés., REINÉ, Fernando. Cuaderno cristales 2013. Colegio San Ignacio Salesianos. [En línea]. [Consultado 08, junio, 2020]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/cuadernocristales2013/home>

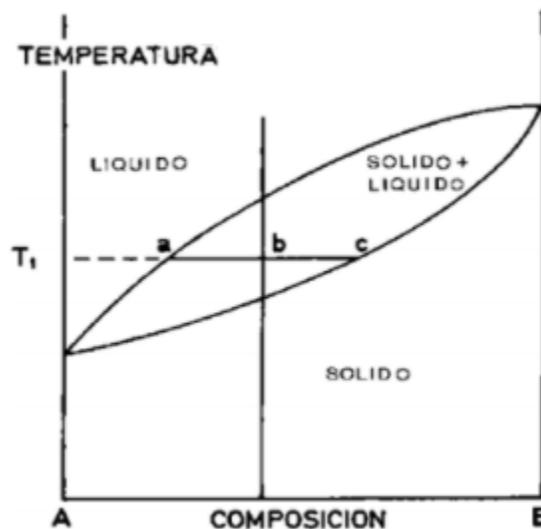
¹⁰⁶ BENVENUTO, Rodrigo. Estudio de la dinámica de cristalización de tres aceites de interés industrial, y caracterización de su microestructura final. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad de Chile. Santiago, Chile: 2017. p.9. [Consultado 08, junio, 2020]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/>

¹⁰⁷ HUERTA, Sergio. Cristalización. [Diapositivas]. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México. Diapositiva 12. [Consultado 08, junio, 2020]. Disponible en: <http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/sho/Cristalizacion.pdf>

¹⁰⁸ TIMMS, Ralph. Fractional crystallisation – the fat modification process for the 21st century. En: European Journal of Lipid Science and Technology. 2005. Vol.107. No.1. p.51.

La composición y cantidad de la fase sólida que forman los cristales depende principalmente de la temperatura.¹⁰⁹ Es por esto que, para los sistemas de cristalización, las relaciones de equilibrio entre la fase sólida y la fase líquida son muy importantes para establecer la temperatura a la cual los triglicéridos van a cristalizar. Esto se puede observar en la gráfica 4 que corresponde a un diagrama de fases de una mezcla binaria de triglicéridos de tipo A y B, el cual muestra que los dos tipos de triglicéridos son completamente miscibles tanto en la fase sólida como en la fase líquida, y que al llevar la mezcla a una temperatura T_1 se forma una fase sólida de composición "c" en un líquido de composición "a", es decir que coexistirían las dos fases donde inicia la etapa de nucleación.

Gráfica 4. Diagrama de fases de una mezcla de triglicéridos A y B.



Fuente: adaptado de: TIMMS, Ralph. Fractional crystallisation – the fat modification process for the 21st century. En: European Journal of Lipid Science and Technology. 2005. Vol.107. No.1. p.51.

• Nucleación

La formación de un cristal comienza con la nucleación, donde se empiezan a formar los cristales más pequeños que puedan existir en una mezcla de triglicéridos de cierta concentración y temperatura. Estos pequeños cristales se denominan núcleos y son los que forman una nueva fase haciendo que coexistan las fases sólida y líquida producto de la solidificación gradual del aceite.¹¹⁰

¹⁰⁹ *Ibíd.*, p.50.

¹¹⁰ TIMMS, Ralph. Fat Crystallization: mechanism and methods for studying. Cairo, 2007.p.11.

Para iniciar el proceso de nucleación las moléculas de los triglicéridos deben estar organizadas en una red cristalina de tamaño crítico y alcanzar la energía suficiente para la formación de los núcleos, que se logra con la sobresaturación.¹¹¹ Dentro de los mecanismos de la nucleación se distinguen dos principalmente: nucleación primaria y nucleación secundaria.

- Nucleación primaria: allí se da la unión de las moléculas más pequeñas de los núcleos que se conocen como embriones, los cuales se ordenan para formar las estructuras cristalinas. Este tipo de nucleación puede ser de tipo homogénea que es la que menos se da, donde los embriones forman dímeros, trímeros y así sucesivamente hasta que la temperatura y condiciones de sobresaturación sean tales que se sea posible la formación de un núcleo, o puede ser de tipo heterogénea que es la más común debido a que generalmente siempre hay presencia de impurezas, la cual inicia con partículas sólidas como polvo o paredes del cristizador donde la interacción entre la partícula sólida y el líquido sobresaturado permite la formación de un nuevo núcleo.¹¹²
- Nucleación secundaria: es la formación de un nuevo núcleo que se da cuando los cristales existentes se fracturan en pequeñas partes y actúan como núcleos estables para que haya una mejor cristalización.¹¹³

• Crecimiento del cristal

La fuerza impulsora del crecimiento del cristal al igual que en la nucleación, también es la sobresaturación. Una vez que se ha formado un núcleo, este comienza a crecer de modo que nuevas moléculas se van incorporando a su superficie, por lo que se considera un proceso de adición capa por capa¹¹⁴, donde la temperatura y la viscosidad son las variables que determinan la tasa de crecimiento de los cristales. A medida que el cristal crece, se afecta la transferencia de temperatura ya que la viscosidad aumenta de manera progresiva. Por esta razón, es necesario que en el sistema haya agitación continua que permita homogenizar la mezcla dentro del cristizador.¹¹⁵

Tanto la tasa de nucleación como la del crecimiento de los cristales se ven afectadas por el tipo de cristal formado. Cuanto más estable es el cristal se vuelve

¹¹¹ BADAN, Ana, et al. Crystallization modifiers in lipid systems. En: Association of Food Scientists & Technologists (India). 2014. p. 3926.

¹¹² *Ibid.*, p.3926.

¹¹³ TIMMS, Ralph. Fat Crystallization: mechanism and methods for studying. Op. Cit., p.12.

¹¹⁴ HUERTA, Sergio. Op. Cit., Diapositiva 21.

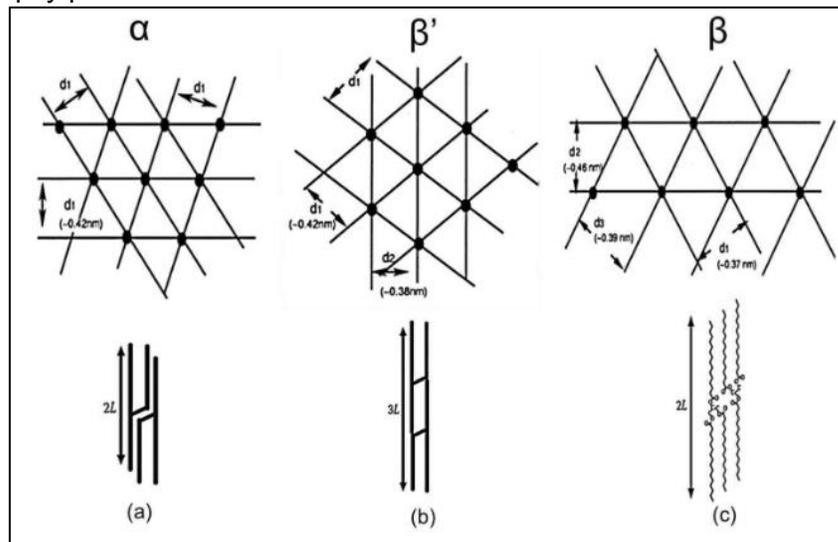
¹¹⁵ PARZANESE, Magali. Cristalización fraccionada: alternativa a las grasas trans. En: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Alimentos Argentinos. [Consultado 08, junio, 2020]. Disponible en: <http://www.alimentosargentinos.gob.ar/>

menos soluble, y por lo tanto la tasa de crecimiento aumenta.¹¹⁶ Esto se debe al polimorfismo de las grasas, que será explicado en la siguiente sección.

- **Polimorfismo**

Las moléculas de triglicéridos de las grasas presentan un fenómeno llamado polimorfismo, lo que quiere decir que solidifican en varios tipos de cristales según la velocidad y temperatura de enfriamiento.¹¹⁷ Cada cristal recibe el nombre de polimorfo y los triglicéridos pueden solidificarse en cualquiera de los tres tipos de subceldas: α (alfa), β' (beta prima) y β (beta), como se puede observar en la imagen 8. Las transiciones van en ese orden, hasta llegar a la estructura cristalina termodinámicamente más estable.¹¹⁸

Imagen 8. Proyecciones espaciales de las formas cristalinas α , β' y β .



Fuente: FONTENELE, Maria, et al. Advances in lipids crystallization technology. En: INTECH. 2015. Capítulo 3.1.5 p. 111.

Según la literatura, la forma α es un empaque de cadena hexagonal de tipo metaestable, la forma β' tiene un empaquetamiento perpendicular ortorrómbico y presenta una estabilidad intermedia, mientras que la forma β tiene empaquetamiento triclinico paralelo y es la de mayor estabilidad.¹¹⁹ A medida que aumenta la estabilidad del polimorfo aumenta su punto de fusión debido a las

¹¹⁶ TIMMS, Ralph. Fat Crystallization: mechanism and methods for studying. Op. Cit., p.15.

¹¹⁷ UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA. Lípidos. [Sitio web]. [Consultado 05, junio, 2020]. Disponible en: <http://sgpwe.izt.uam.mx/pages/cbs/epa/archivos/quimalim/lipidos.pdf>

¹¹⁸ TIMMS, Ralph. Fat Crystallization: mechanism and methods for studying. Op. Cit., p.3.

¹¹⁹ FONTENELE, María., Et al. Op. Cit., Capítulo 3.1.5. p.111.

diferencias en la densidad del empaquetamiento molecular, siendo la forma α la menos densa.¹²⁰

Las formas de empaquetamiento de los triglicéridos de las grasas que finalmente darán la estructura cristalina de estas son de suma importancia para la industria alimentaria en la formulación de productos grasos como margarinas y mantecas. Cada forma del cristal tiene propiedades únicas con respecto a textura, plasticidad y aireación.¹²¹

- **Separación de los cristales**

Además de los parámetros mencionados anteriormente, la concentración de los triglicéridos deseada tanto de la fracción líquida como de la fracción sólida obtenida en el proceso de cristalización también depende de la etapa de separación, ya que los triglicéridos se pueden encontrar en tres ubicaciones diferentes: en la fase sólida correspondiente a los cristales formados, en el aceite que no cristalizó o en el aceite no cristalizado que se encuentra atrapado entre los cristales. Debido a esto, según la ubicación de los triglicéridos de interés, se pueden llevar a cabo distintos métodos de separación como lo son la centrifugación, la filtración al vacío o la filtración por prensado.¹²²

3.1.4 Métodos cromatográficos. La cromatografía líquida (HPLC) se emplea para la separación de ácidos grasos omega-3 a partir de microalgas y aceite de pescado. Sin embargo, se reporta que es más fácil separar DHA de aceite de células sencillas que de aceite de pescado, debido a que este último tiene una composición más compleja. Con esta técnica, los ésteres de ácidos grasos son eluidos a partir de su número de equivalentes de carbonos: los ésteres con el mismo número pueden separarse en ciertas condiciones óptimas.¹²³

No solamente la cromatografía líquida se usa para la concentración de DHA, también existen diferentes métodos o combinación de estos como los son la cromatografía de iones de plata en conjunto con columnas monolíticas de HPLC. Sin embargo, los tiempos a largo plazo y la baja capacidad de intercambio iónico

¹²⁰ HERRERA, María. El polimorfismo en sistemas grasos y sus aplicaciones tecnológicas. [En línea]. Universidad de Buenos Aires. [Consultado 05, junio, 2020]. Disponible en: https://www.ib.edu.ar/aacr2019/wp-content/uploads/2020/01/taller_6_Herrera_CongresoAACr2019_Polimorfismo-sistemas-grasos.pdf

¹²¹ FONTENELE, María., Et al. Op. Cit., Capítulo 3.1.5. p.111.

¹²² TIMMS, Ralph. Fractional crystallisation – the fat modification process for the 21st century. Op. Cit., p.52.

¹²³ BONILLA, HOYOS. Op. Cit., p. 636

de la columna x200 limitan el uso de este catión de columna empaquetado de intercambio para separaciones cromatográficas de iones de plata a escala.¹²⁴

3.1.5 Formación de complejos con urea. Esta técnica es una de las más sencillas ya que se basa en la formación de un complejo de inclusión de la urea y el ácido graso. Así lo define un grupo de investigación en simulación para ingeniería química, donde los autores llevan a cabo este método para el fraccionamiento de etil ésteres de ácidos grasos con urea, donde explican que el complejo consiste en un cristal tetragonal. Sin embargo, en presencia de un ácido graso forma un cristal hexagonal, al constituir este complejo de inclusión. Solamente las moléculas de ácidos grasos lineales tienen la posibilidad de formar tales estructuras. De este modo los saturados y los monoinsaturados pueden ser separados de los poliinsaturados, que son los de interés. Este método es simple y adecuado para obtener concentrados de ácidos grasos C-18 poliinsaturados; pudiéndose emplear en conjunto con otras técnicas de concentración y purificación.¹²⁵

De igual manera un estudio realizado en concentración de ácidos grasos de omega-3 del aceite de pescado de sardina arco iris por varios métodos entre ellos la formación de complejos de urea combinado con enfriamiento y una previa filtración en donde se demostró que las cantidades más altas de DHA y EPA se encontraron a temperaturas de -10°C y 1°C, respectivamente, de donde se enriqueció el DHA 17,45 a 29,61% y EPA de 15,39 a 19,76%.¹²⁶ De igual manera se determinó que la eliminación completa de ácidos grasos saturados por complejos de urea puede ser imposible ya que algunos de los ácidos grasos saturados no forman complejos con la urea durante la cristalización, es decir, este método no asegura una reducción total de las grasas saturadas por lo cual el producto final obtenido de esta manera puede generar en el consumidor un aumento en el colesterol e incurrir en afecciones a su salud.

Por otra parte, otro estudio que buscaba optimizar los parámetros del proceso por complejos de urea para concentración de ácido docosahexaenoico (DHA) y ácido eicosapentaenoico (EPA) de aceite de atún lograron determinar que los mejores valores en dicho estudio fueron: una relación de urea-ácido graso de 15, una temperatura de cristalización de -5 °C, y un tiempo de cristalización de 20 horas; y bajo estas condiciones, el contenido total de DHA y de EPA se puede aumentar

¹²⁴ FRAGAN, Peter; WIJESUNDERA, Chakra. Rapid isolation of omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids using monolithic high performance liquid chromatography columns. En: Journal of Separation Science. 2013, Vol 36, Issue 11, p 1748. ISSN: 1615-9314

¹²⁵ BRAGAGNINI, Virginia, MAGNANI, Ezequiel. Fraccionamiento con urea de etil ésteres de ácidos grasos obtenidos por transesterificación de aceites vegetales. [En línea]. Universidad Tecnológica Nacional. [Consultado 05, junio, 2020]. Disponible en: <http://ria.utn.edu.ar/>

¹²⁶ HOMAYOONI, B., SAHARI, Mohammad., BARZEGAR, Mohsen. Concentrations of omega-3 fatty acids from rainbow sardine fish oil by various methods. En: International Food Research Journal. 2014. Vol. 21. Issue 1. p 746. ISSN: 2231 7546

hasta el 85,02% con un rendimiento de recuperación de líquido del 25,10% del peso del aceite de atún original.¹²⁷

3.1.6 Destilación molecular. Hoy en día la destilación molecular es la técnica más utilizada a escala de producción comercial, para el fraccionamiento y concentración de los ácidos grasos omega-3. Esta técnica se basa en la evaporación de los componentes de una mezcla generalmente en forma de película descendente en contacto con una superficie que es calentada, posterior a una condensación en una superficie fría cercana a la anterior. La distancia entre las dos superficies es más cercana que el camino que puedan tomar las moléculas y por esto la destilación molecular también se denomina short-path.¹²⁸

Inicialmente se debe preparar la materia prima antes de llevar a cabo la destilación molecular, ya que los ácidos grasos de la muestra deben separarse de la molécula de glicerol para convertirse en ésteres etílicos de ácidos grasos. Una de las opciones es realizar una transesterificación a través de una reacción de alcoholisis cuya temperatura de operación se encuentra entre 50-78°C utilizando un reactor con agitación. En esta reacción se emplea KOH como catalizador y el tiempo de reacción puede variar de una a dos horas. Posterior a este proceso, el producto de interés de la reacción ingresa a un destilador molecular que consiste en un evaporador con una chaqueta de calentamiento y un condensador interno. El fluido desciende a través del cilindro y se evapora parcialmente para luego ser condensado. La temperatura de funcionamiento del equipo se encuentra entre 60-150°C y una presión de trabajo entre 0,07-4Pa lo que aumenta la volatilidad relativa de los componentes permitiendo separarlos fácilmente.¹²⁹

Este método permite obtener productos altamente concentrados, sin embargo, las bajas presiones y las condiciones de temperatura relativamente altas que requiere el método hacen que sea un proceso costoso, que además de requerir equipos especiales para su ejecución necesita una etapa de pretratamiento de la materia prima por lo que es necesario el uso de reactivos y la adquisición de más equipos. Además, las temperaturas elevadas ponen en riesgo los AGPI ya que se pueden presentar reacciones de hidrólisis y oxidación y la producción de isómeros trans.¹³⁰

¹²⁷ LIU, Shucheng, et al. Concentration of docosahexaenoic acid (DHA) and eicosapentaenoic acid (EPA) of tuna oil by urea complexation: optimization of process parameters. En: Journal of Food Engineering. 2006. Vol.73. Issue 3. pp.203-209. ISSN: 0260-8774

¹²⁸ ROSSI, Pablo, et al. Fractionation and concentration of omega-3 by molecular distillation. En: Eicosapentaenoic Acid. Editores: Theodore Bradley, Francisco Vargas. p. 177. ISBN: 978-1-62257-480-3

¹²⁹ *Ibíd.*, p. 179-180.

¹³⁰ FRAGAN, Peter; WIJESUNDERA, Chakra. *Op. Cit.*, p. 1744.

3.2 DISEÑO DE LA MATRIZ DE DECISIÓN

De acuerdo con los métodos mencionados anteriormente, se realizará una matriz de decisión donde serán evaluados. Por tal razón, se les asignará una respectiva abreviación la cual se puede observar en el cuadro 3.

Cuadro 3. Abreviaciones de los métodos a evaluar en la matriz de decisión.

| Método | Abreviación |
|---|-------------|
| Concentración por métodos enzimáticos | CME |
| Fraccionamiento por fluidos supercríticos | FFSC |
| Cristalización fraccionada | CF |
| Fraccionamiento por métodos cromatográficos | FMC |
| Formación de complejos con urea | FCU |
| Destilación molecular | DM |

Fuente: elaboración propia

3.2.1 Criterios de evaluación. Dicho lo anterior, se debe seleccionar el método que tenga el mejor resultado de acuerdo con diferentes criterios que serán evaluados en la matriz de decisión. Los criterios que se consideraron para el diseño de la matriz son los siguientes:

- **Invasivo:** Este criterio hace referencia al nivel de modificación de las propiedades originales del aceite después de haberse realizado el método.
- **Impacto ambiental:** Este criterio hace referencia al nivel de daño que pueda ocasionar el método empleado, ya sea por el uso de reactivos, residuos peligrosos generados, cantidad de uso de agua, ruido ambiental, entre otros.
- **Escalamiento:** Viabilidad de hacer uso a nivel industrial del método, instrumentos y/o equipos asociados.
- **Consumo energético:** Cantidad de energía consumida por los diferentes equipos, sistemas de refrigeración, bombas, entre otros; implicados en el proceso.
- **Disponibilidad equipos:** Hace referencia a que tan utilizado es el equipo, es decir, la facilidad de consecución del equipo debido a lo novedoso, reciente o a la antigüedad del método. De igual manera hace referencia a que tan fácil es lograr el préstamo de estos equipos por parte de instituciones educativas, empresas privadas o laboratorios de investigación a nivel nacional.
- **Costos de operación:** Costos asociados a la materia prima, equipos e insumos que requiere cada método.
- **Pretratamiento materia prima:** Se establece como las operaciones y procesos unitarios donde se requiera el uso de reactivos, solventes y/o catalizadores para adecuar la materia prima (aceite) a cada método y equipo.
- **Tiempo medio de procesamiento:** Tiempo que transcurre desde que inicia a funcionar el equipo con el aceite, hasta el momento en que se logra concentrar el aceite (finalización del método).

3.2.2 Puntajes y niveles de los criterios de evaluación. Una vez establecidos los criterios de la matriz, para poder realizar un análisis cuantitativo de esta, se establecen unos niveles para cada criterio y a su vez un puntaje para cada nivel los cuales se pueden observar en el cuadro 4. Cada criterio tiene 3 niveles en donde el valor máximo asignado es un valor de 3 y el mínimo 1; siendo 3 el valor más favorable y 1 siendo el menos favorable.

Cuadro 4. Puntaje asignando a los criterios de evaluación en la matriz de decisión.

| | |
|----------------|--------------------------------------|
| Puntaje | Invasivo |
| 1 | Muy invasivo |
| 2 | Poco invasivo |
| 3 | No invasivo |
| Puntaje | Impacto ambiental |
| 1 | Alto |
| 2 | Moderado |
| 3 | Leve |
| Puntaje | Escalamiento |
| 1 | Complejo |
| 2 | Escalable con modificaciones |
| 3 | Fácilmente escalable |
| Puntaje | Consumo energético |
| 1 | Alto |
| 2 | Moderado |
| 3 | Bajo |
| Puntaje | Disponibilidad equipos |
| 1 | Baja disponibilidad |
| 2 | Disponibilidad asociada a factores |
| 3 | Disponible |
| Puntaje | Costos de operación |
| 1 | Alto |
| 2 | Medio |
| 3 | Bajo |
| Puntaje | Pretratamiento materia prima |
| 1 | Fisicoquímico |
| 2 | Químico o físico |
| 3 | No necesita pretratamiento |
| Puntaje | Tiempo medio de procesamiento |
| 1 | >10 horas |
| 2 | 9 h > t > 3h |
| 3 | < 2 horas |

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con el cuadro 4, en cuanto al puntaje 2 (escalamiento con modificaciones) del criterio de escalamiento, se debe aclarar que hace referencia a las posibles adaptaciones que implicarían determinados equipos o instrumentos del método para poder escalarse. De igual manera en cuanto al puntaje 2 (Disponibilidad asociada a factores) del criterio de disponibilidad de equipos tiene relación con aquellos factores que pueden dificultar el préstamo de los equipos tales como: acuerdo o convenios con la empresa o universidad que posea el equipo, ciudad o departamento en donde se encuentre el equipo, entre otros.

Así mismo, a los criterios establecidos previamente se les asigna un porcentaje de ponderación los cuales se pueden observar en el cuadro 5. Se destaca que los porcentajes con mayor valor corresponden a invasivo, pretratamiento de materia prima y disponibilidad de equipos, debido a que el método que se va a seleccionar en la matriz debe tener como prioridad estos criterios para que luego de realizar el método, la materia prima (aceite virgen de sacha inchi) conserve sus propiedades sin tener mayor modificación en estas. De igual manera se debe tener en cuenta que el método seleccionado sea fácil de realizar y no se tenga dificultad en poder tener acceso o disponibilidad a sus equipos.

Cuadro 5. Porcentaje de ponderación para los criterios de evaluación.

| Factor | Criterio | Porcentaje de ponderación |
|---------------|-------------------------------|----------------------------------|
| A | Invasivo | 20% |
| B | Impacto ambiental | 10% |
| C | Escalamiento | 15% |
| D | Consumo energético | 5% |
| E | Disponibilidad equipos | 15% |
| F | Costos de operación | 10% |
| G | Pretratamiento materia prima | 20% |
| H | Tiempo medio de procesamiento | 5% |

Fuente: elaboración propia.

3.2.3 Matriz de decisión. Una vez establecidos los criterios a evaluar y el porcentaje de ponderación de cada criterio, se realiza la matriz de decisión con los métodos propuestos con sus respectivas abreviaciones. Posterior a esto, se determina el puntaje para cada caso, lo cual se puede apreciar en la tabla 11.

Tabla 11. Puntaje establecido para cada método de concentración propuesto.

| | CME | FFSC | CF | FMC | FCU | DM |
|----------|------------|-------------|-----------|------------|------------|-----------|
| A | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| B | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| C | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 |
| D | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| E | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| F | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 |
| G | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| H | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 |

Fuente: elaboración propia

Una vez determinado el puntaje para cada método se procede a evaluar dicho puntaje con su respectivo porcentaje de ponderación, valores que se observan en la tabla 12. Con estos valores y realizando su respectiva suma, se logra establecer el método más favorable para poder realizar la concentración del aceite virgen de sachá inchi como fuente de omega-3.

Tabla 12. Matriz de decisión para la selección del método de concentración de omega-3.

| | CME | FFSC | CF | FMC | FCU | DM |
|----------------|------------|-------------|------------|------------|------------|-----------|
| A (20%) | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| B (10%) | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| C (15%) | 0,3 | 0,15 | 0,45 | 0,15 | 0,45 | 0,15 |
| D (5%) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| E (15%) | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,45 | 0,3 | 0,15 |
| F (10%) | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 0,1 |
| G (20%) | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 0,4 | 0,2 |
| H (5%) | 0,05 | 0,15 | 0,05 | 0,1 | 0,05 | 0,1 |
| Total | 1,95 | 2,1 | 2,5 | 2 | 2,4 | 1,7 |

Fuente: elaboración propia

El valor más alto obtenido en la matriz de decisión corresponde a 2,5, valor numérico que pertenece al método de cristalización fraccionada (CF), siendo de esta manera el método seleccionado para la concentración del aceite virgen de sachá inchi como fuente de omega-3, debido a que es un método no invasivo que no altera las propiedades del aceite durante su procesamiento, la muestra de aceite solamente requiere de un pretratamiento físico, por lo que no hay consumo de reactivos ni solventes lo cual reduce el impacto ambiental y además es fácilmente escalable. Por tal motivo es importante una vez seleccionado el método, poder determinar las especificaciones técnicas de este y del mismo modo las variables del proceso identificando las más importantes las cuales serán descritas en el capítulo siguiente.

4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA CRISTALIZACIÓN FRACCIONADA

El diseño y características de los equipos donde se lleva a cabo la cristalización fraccionada, así como la identificación y control de las variables que tengan una mayor influencia en el proceso son fundamentales para que haya una buena cristalización del aceite. Por lo tanto, en este capítulo se especificarán las características de los equipos y las variables que se deben tener en cuenta para la concentración de AGPI de aceites teniendo en cuenta que el método de cristalización fraccionada es un proceso tipo batch. Adicional a lo anterior, se establece la propuesta de las condiciones de operación para llevar a cabo la cristalización fraccionada del aceite de sachá inchi junto con el diseño de un prototipo y sus componentes para llevar a cabo este método a nivel laboratorio.

4.1 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA CRISTALIZACIÓN

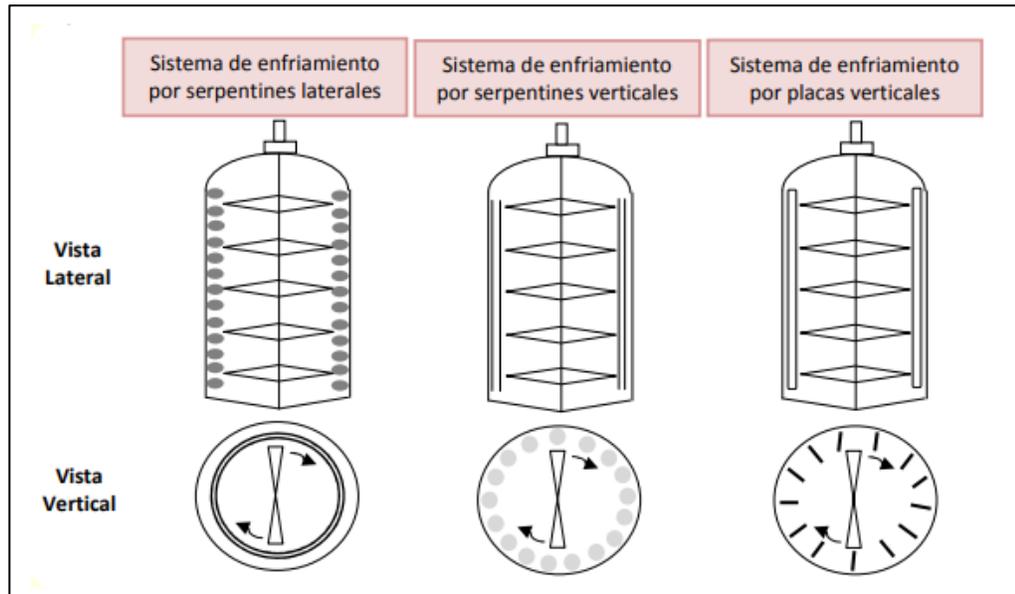
4.1.1 Tanques cristalizadores. La cristalización fraccionada se puede llevar a cabo en distintos tipos de tanques cristalizadores de acero inoxidable que se muestran en la imagen 9. El sistema de intercambio de calor del equipo generalmente se diseña utilizando agua como refrigerante a través de serpentines, los cuales pueden tener diferentes orientaciones según el tiempo que requiera la etapa de cristalización. Para el sistema de agitación continua, generalmente se usan agitadores tipo impulsores.¹³¹

Estas dos características son determinantes para que el aceite siga una curva de enfriamiento definida. Dicha curva de enfriamiento consiste en un perfil de temperatura del aceite en función del tiempo de residencia en el cristizador, lo que permite controlar la tasa de nucleación y el tamaño de los cristales. Para su determinación generalmente se emplea la resonancia magnética nuclear la cual permite medir la cantidad de grasa cristalizada y por lo tanto el momento en el que la cristalización es estable.¹³²

¹³¹ TECNOLOGÍAS PARA LA INDUSTRIA ALIMENTARIA. Cristalización. En: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Alimentos Argentinos.p.6. [Consultado 11, junio, 2020]. Disponible en:http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_10_Fraccionamiento.pdf

¹³² MÉNDEZ, María. Op. Cit., p.21.

Imagen 9. Tanques cristalizadores convencionales con sistema de agitación.



Fuente: TECNOLOGÍAS PARA LA INDUSTRIA ALIMENTARIA. Cristalización. En: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Alimentos Argentinos. p.6. [Consultado 11, junio, 2020]. Disponible en: http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_10_Fraccionamiento.pdf

4.1.2 Filtros. Posterior a la etapa de cristalización, se realiza la separación de las fracciones obtenidas por medio de una filtración. Para esto, se pueden utilizar distintos filtros dependiendo de las características de la materia prima y de los productos finales de la cristalización, así como del espacio disponible para la instalación del equipo.¹³³

Uno de ellos es el filtro de tambor rotativo de vacío que se puede observar en la imagen 10, donde se lleva a cabo la separación por presión reducida generalmente entre 0,5-0,7bar. Inicialmente la bomba de vacío succiona la fase líquida y por lo tanto sobre la superficie del tambor se concentra la torta con los cristales los cuales se secan por acción de una corriente gaseosa y finalmente se descargan por contracorriente de aire y raspado. El uso de este tipo de filtro es recomendable cuando se quieren obtener fracciones cristalizadas blandas ya que los cristales quedan recubiertos del aceite que no cristalizó, o bien pueden tener el aceite atrapado en su interior.¹³⁴

¹³³ TECNOLOGÍAS PARA LA INDUSTRIA ALIMENTARIA. Cristalización. Op. Cit., p.8.

¹³⁴ KELLENS, Marc. Developments in fat fractionation technology. En: Oils & Fats symposium Fractional Crystallisation of Fats. p.9. ISSN 1353-114X

Imagen 10. Filtro de tambor rotativo de vacío.



Fuente: DIRECT INDUSTRY. Filtro de tambor. [Sitio web]. [Consultado 11, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/bhs-sonthofen/product-61414-1922776.html>

El otro filtro que se emplea con mayor frecuencia es el filtro prensa de membranas que se muestra en la imagen 11. Este consta de una serie de placas filtro que se mantienen juntas por medio de un cilindro hidráulico. Este tipo de filtro tiene la ventaja de que su superficie es mucho más grande que la del filtro de tambor rotativo, lo que permite que haya una filtración más rápida y uniforme.¹³⁵ Su operación inicia con el llenado del filtro con la mezcla de las fracciones sólida y líquida de la etapa de cristalización. Posteriormente la fracción líquida se separa aplicando presión que puede estar en un rango entre 4-8 bar y luego se estrujan los cristales que quedaron para retirar el aceite que esté depositado en su interior. Finalmente, el filtro se abre y se descarga la fracción sólida por acción de la gravedad.¹³⁶

¹³⁵ *Ibíd.*, p.9.

¹³⁶ TECNOLOGÍAS PARA LA INDUSTRIA ALIMENTARIA. Cristalización. Op. Cit., p.7.

Imagen 11. Filtro prensa de membranas.



Fuente: HIDROMETÁLICA. Filtro prensa. [Sitio web]. [Consultado 11, junio, 2020. Disponible en: <https://hidrometalica.com/filtro-de-prensa/>]

4.2 CONDICIONES DEL PROCESO DE CRISTALIZACIÓN

Como se mencionó en la sección 3.1.3 la cristalización fraccionada es un proceso que depende de la capacidad de los ácidos grasos del aceite para desarrollar una fase sólida realizando un enfriamiento controlado seguido de una filtración. Durante la cristalización, hay algunas variables que determinan la eficiencia del proceso y la calidad del aceite obtenido las cuales se describen a continuación:

- **Temperatura de calentamiento del aceite:** esta temperatura es muy importante ya que inicialmente todos los ácidos grasos contenidos en el aceite deben derretirse completamente a una temperatura que esté muy por encima de su punto de fusión, ya que una baja temperatura puede ocasionar prenucleación de los AGS lo que afecta el crecimiento de los cristales y dificulta la separación.¹³⁷
- **Tasa de enfriamiento del aceite:** se debe mantener cierto rango de temperatura en la velocidad de enfriamiento del aceite para controlar la etapa de nucleación y promover un crecimiento adecuado de los cristales. Una alta tasa de enfriamiento hace que se formen cristales pequeños que pueden incidir el proceso de filtración ya que afectan el rendimiento del equipo y este requerirá de una limpieza frecuente.¹³⁸

¹³⁷ GUPTA, Monoj K. Winterization and fractionation of selected vegetable oils. En: Practical guide to vegetable oils processing. En: AOCS Press. 2017. Capítulo 11. p. 294.

¹³⁸ *Ibíd.*, p.295.

- **Temperatura final del aceite:** se debe mantener una temperatura moderada ya que a temperaturas muy altas pueda que los ácidos grasos de alto punto de fusión no hayan cristalizado y a temperaturas muy bajas la viscosidad del aceite puede aumentar dificultando la filtración.¹³⁹
- **Agitación:** el sistema debe contar con una agitación continua para homogenizar la mezcla y mantener libre de sólidos la pared del cristizador. Se debe tener en cuenta que una velocidad de agitación alta puede afectar los sólidos perturbando la matriz cristalina.¹⁴⁰
- **Tiempo final de cristalización:** esta variable es muy importante para determinar exactamente en qué momento se deben separar las fracciones y depende del contenido de AGS que contenga el aceite a cristalizar.¹⁴¹

Al no existir estudios sobre la cristalización fraccionada específicamente del aceite de sacha inchi, se mencionarán las especificaciones técnicas y condiciones del método con valores y datos reportados en la bibliografía de otros aceites vegetales similares en su composición como lo son el aceite de chía, el aceite de pescado y el aceite de linaza, cuyo perfil de ácidos grasos se encuentra en la tabla 13 donde se evidencia su alto contenido en omega-3 y AGI presentando valores cercanos a los reportados para el aceite de sacha inchi. Debido a que el perfil de ácidos grasos del aceite de sacha inchi fue una recopilación de referentes bibliográficos (tabla 8), con base en estos estudios se establecieron los rangos porcentuales para cada tipo de ácido graso presente en el aceite de sacha inchi, para poder comparar su contenido de ácidos grasos con el de los aceites mencionados.

¹³⁹ *Ibíd.*, p.295.

¹⁴⁰ *Ibíd.*, p.295.

¹⁴¹ LEÓN, Sergio., POSSO, Jineth. Evaluación del comportamiento de los triglicéridos POP, POS y SOS en la cristalización fraccionada y separación de una mezcla grasa para la obtención de CBE. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad de América. Bogotá: 2018. p.53. [Consultado 11, junio, 2020]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6719>

Tabla 13. Comparación del perfil de ácidos grasos del aceite de chía, pescado y linaza versus aceite de sachá inchi.

| Ácido Graso (%) | Aceite de chía¹⁴² | Aceite de pescado¹⁴³ | Aceite de linaza¹⁴⁴ | Aceite de sachá inchi |
|-------------------------------|-------------------------------------|--|---------------------------------------|------------------------------|
| Mirístico (C14:0) | 0,03 | --- | --- | 0,02-1,24 |
| Palmítico (C16:0) | 6,83 | --- | 5,4 | 3,60-4,50 |
| Palmitoleico (C16:1) | 0,09 | --- | --- | 0,05 |
| Margárico (C17:0) | --- | --- | --- | 0,08-0,091 |
| Estearico (C18:0) | 2,71 | --- | 3,80 | 2,40-3,20 |
| Oleico ω 9 (C18:1) | 8,26 | --- | 19,20 | 8,45-9,98 |
| Linoleico ω 6 (C18:2) | 11,92 | --- | 16,30 | 33,40-36,99 |
| Linolénico ω 3 (C18:3) | 61,28 | 20,3 | 54,60 | 42,20-50,80 |
| Σ AGI | 81,55 | 96,30 | 90,10 | 88,79-93,30 |
| Σ AGS | 9,57 | 24,10 | 9,20 | 6,50-8,94 |

Fuente: elaboración propia.

¹⁴²ULLAH, Rahman, et al. Fractionation of Chia Oil for Enrichment of Omega-3 and 6 Fatty Acids and Oxidative Stability of Fractions. En: Food and Science Biotechnology. 2016. Vol. 25. No. 1. p. 44.

¹⁴³TENGGU, Rozaina, T.M., BIRCH, Edward. Effects of fractionation on melting and crystallisation profiles of hoki oil measured by DSC. En: Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2015. Vol.120. No.1. p.397.

¹⁴⁴DASGUPTA, S., DREIACK, N., AY, P. Melt crystallization kinetics for enrichment of highly unsaturated fatty acid fractions based on linseedoil. En: Journal of Environmental Research and Development. 2016. Vol.11. No.1. p.2. ISSN 0973 – 6921

4.2.1 Cristalización del aceite de chía. Ullah, et al¹⁴⁵ realizaron el fraccionamiento del aceite de chía con el objetivo de enriquecer la fracción líquida del aceite con ácidos grasos omega-3 y omega-6 para extender las aplicaciones en la preparación de productos alimenticios y para estudiar las características químicas de las fracciones sólidas y líquidas obtenidas después de la cristalización.

El proceso inicia con el calentamiento del aceite de chía en un horno a 63°C durante 30 minutos con el objetivo de que los ácidos grasos de alto punto de fusión se derritan. Luego de esto el aceite se enfría lentamente desde temperatura ambiente hasta -30°C en un congelador durante 4 horas. Transcurrido este tiempo, las fracciones sólida y líquida se separan usando un embudo Buchner con una bomba de vacío a una presión de 0,53 bar. Finalmente, ambas fracciones se almacenan por separado en botellas de vidrio ámbar a -60°C para su posterior caracterización.¹⁴⁶

Los resultados de la cristalización del aceite de chía se pueden observar en la tabla 14, donde se muestra el perfil de ácidos grasos de las fracciones líquida y sólida en comparación con el perfil lipídico del aceite antes del proceso. Allí se puede evidenciar que el contenido de omega-3 en el aceite aumentó pasando de tener 61,28% a un 72,16% en la fracción líquida. Igualmente se incrementó la concentración de omega-6 en la fracción líquida a un 15,22% cuando inicialmente el aceite contenía 11,92%. Con respecto a la fracción sólida, su contenido de omega-3 y omega-6 fue de 44,24% y 8,74% respectivamente. Adicional a esto, se puede resaltar que la fracción sólida se concentró en ácidos grasos saturados como el palmítico que pasó de un 6,83% a un 14,61% y el esteárico donde se obtuvo un 22,62% en comparación con el 2,71% que contenía el aceite original.

Después de realizar el fraccionamiento del aceite de chía, se almacenaron tanto el aceite inicial como las fracciones obtenidas durante 6 meses a 4°C y a 25°C para evaluar su estabilidad oxidativa. Según la composición de los ácidos grasos que presentaron las muestras transcurridos los 6 meses, se evidenció que a 4°C y 25°C la cantidad de AGI disminuyó, mientras que los AGS aumentaron debido a la generación de productos de oxidación. Por lo tanto, se determinó que, para mantener la estabilidad oxidativa de las muestras, estas deben almacenarse a bajas temperaturas para mantener una alta concentración de AGI.¹⁴⁷

¹⁴⁵ ULLAH, Rahman. Et al. Op. Cit., p. 41.

¹⁴⁶ *Ibid.*, p.42.

¹⁴⁷ *Ibid.*, p.46.

Tabla 14. Perfil de ácidos grasos de la fracción líquida y la fracción sólida del aceite de chía.

| Ácido Graso (%) | Aceite de chía antes de la cristalización | Fracción líquida después de la cristalización | Fracción sólida después de la cristalización |
|-----------------------|---|---|--|
| Palmítico (C16:0) | 6,83 | 1,52 | 14,61 |
| Esteárico (C18:0) | 2,71 | 0,42 | 22,62 |
| Oleico ω9 (C18:1) | 8,26 | 10,16 | 7,15 |
| Linoleico ω6 (C18:2) | 11,92 | 15,22 | 8,74 |
| Linolénico ω3 (C18:3) | 61,28 | 72,16 | 44,24 |

Fuente: elaboración propia, con base en: ULLAH, Rahman. Et al. Fractionation of Chia Oil for Enrichment of Omega-3 and 6 Fatty Acids and Oxidative Stability of Fractions. En: Food and Science Biotechnology. 2016. Vol. 25. No. 1. p. 44.

4.2.2 Cristalización del aceite de pescado. Tengku, et al¹⁴⁸ en su artículo hablan sobre un estudio donde se fraccionó una muestra de aceite de pescado hoki por medio de cristalización fraccionada por el método convencional y por cristalización con el uso de solventes. El objetivo de la investigación fue medir los efectos del fraccionamiento de los triglicéridos por punto de fusión y el contenido de sólidos de la grasa obtenida en ambos métodos de cristalización usando la técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC).

Para el fraccionamiento por el método convencional se pesaron 10 gramos de muestra de aceite en un tubo de centrifuga de 15 mililitros y se mantuvo a -10°C durante 24 horas. Posteriormente, con el objetivo de separar las fracciones se centrifugó la muestra a 0°C durante 5 minutos a 3000 rpm y las fracciones se transfirieron a una tapa de teflón ámbar. Las muestras de aceite y sus fracciones se almacenaron a -20°C hasta el análisis DSC.¹⁴⁹

¹⁴⁸ TENGKU, Rozaina, T.M., BIRCH, Edward. Op. Cit., p.396.

¹⁴⁹ *Ibid.*, p.2.

Los resultados en cuanto al perfil de ácidos grasos del aceite de pescado hoki y sus fracciones después de llevar a cabo el método de cristalización, se muestran en la tabla 15. El perfil lipídico se obtuvo por cromatografía de gases con detector de ionización de llama. En los resultados se observa que llevando a cabo el método de cristalización fraccionada se logró concentrar la fracción líquida en DHA Y EPA, principales ácidos grasos del omega-3, al igual que el contenido de AGPI presente en el aceite hoki inicial.

Tabla 15. Perfil de ácidos grasos del aceite de pescado hoki y de sus fracciones líquidas obtenidas por cristalización fraccionada convencional (CF).

| Ácido graso (%) | Aceite hoki inicial | Fracción líquida por CF | Fracción sólida por CF |
|-----------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| Σ AGS | 24,1 | 21,4 | 25,2 |
| Σ AGM | 47,2 | 47,0 | 46,4 |
| Σ AGPI | 28,8 | 31,6 | 28,4 |
| DHA | 12,7 | 14,6 | 12,6 |
| EPA | 7,6 | 8,1 | 7,3 |

Fuente: elaboración propia, con base en: TENGGU, Rozaina, T.M., BIRCH, Edward. Effects of fractionation on melting and crystallisation profiles of hoki oil measured by DSC. En: Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2015. Vol.120. No.1. p.397.

4.2.3 Cristalización del aceite de linaza. Dasgupta, et al¹⁵⁰ en su estudio realizaron la concentración de omega-3 de una muestra de aceite de linaza por medio de cristalización fraccionada sometiendo al aceite a diferentes temperaturas para establecer aquella donde se obtenía el máximo rendimiento de AGI, luego de una separación por centrifugación.

Adicional a lo anterior, en el estudio se realizó una calorimetría diferencial de barrido para establecer los puntos de fusión de los ácidos grasos que contiene el aceite de linaza, los cuales se muestran en la tabla 16.

¹⁵⁰ DASGUPTA, S., DREIACK, N., AY, P. Op. Cit., p.1.

Tabla 16. Punto de fusión de los ácidos grasos que contiene el aceite de linaza.

| Ácidos grasos | Composición (%) | Punto de fusión (°C) |
|----------------------------------|-----------------|----------------------|
| Palmítico (C16:0) | 5,4 | 63,1 |
| Estearico (C18:0) | 3,8 | 70,6 |
| Oleico ω 9 (C18:1) | 19,2 | 13,7 |
| Linoleico ω 6 (C18:2) | 16,3 | -5,4 |
| Linolénico ω 3 (C18:3) | 54,6 | -10,9 |

Fuente: elaboración propia, con base en: DASGUPTA, S., DREIACK, N., AY, P. Melt crystallization kinetics for enrichment of highly unsaturated fatty acid fractions based on linseedoil. En: Journal of Environmental Research and Development. 2016. Vol.11. No.1. p.2. ISSN 0973 – 6921.

La cristalización se realizó en un sistema de reactores que consta de dos recipientes de reactor que operan de manera independiente. Inicialmente con el objetivo de homogenizar las muestras, estas se calientan a una temperatura por encima de su punto de fusión. Luego de esto todas las muestras se enfrían de 25°C a 16°C durante dos horas para asegurar que el sistema llegue al equilibrio. Posteriormente, las muestras se someten a diferentes temperaturas de cristalización correspondientes a 13°C, 8°C, 3°C y -2°C máximo durante un periodo de 3 horas creando distintos grados de sobresaturación. La temperatura final se mantuvo constante durante un tiempo para promover el crecimiento de los cristales y que la fracción líquida se enriqueciera de los AGI que no cristalizaron. Finalmente, la fase sólida y la fase líquida ingresaron a una centrífuga isotérmica durante 20 minutos con una fuerza de 4000G, donde se lograron separar.¹⁵¹

En la tabla 17 se pueden observar los resultados del perfil de ácidos grasos a diferentes temperaturas de cristalización obtenidos por cromatografía de gases. Con base en la tabla, se determinó que a -2°C se obtuvieron los mejores resultados de cristalización del aceite de linaza, ya que el contenido de AGS se encuentra por debajo del 3%, y el contenido de omega-3 fue de 57,2% en comparación con el 53,3% a una temperatura de 24°C.

¹⁵¹ *Ibíd.*, p.2.

Tabla 17. Resultados obtenidos del perfil de ácidos grasos del aceite de linaza a diferentes temperaturas de cristalización.

| Ácido Graso (%) | Valor inicial | -2°C | 3°C | 8°C | 13°C | 24°C |
|-----------------------|---------------|------|------|------|------|------|
| Palmítico (C16:0) | 5,4 | 2,1 | 2,6 | 3,1 | 4,1 | 5,4 |
| Estearico (C18:0) | 3,8 | 0,8 | 0,9 | 1,4 | 2,0 | 3,5 |
| Oleico ω9 (C18:1) | 19,2 | 20,1 | 22,5 | 22,3 | 22,0 | 21,3 |
| Linoleico ω6 (C18:2) | 16,3 | 17,3 | 16,7 | 16,5 | 16,2 | 15,6 |
| Linolénico ω3 (C18:3) | 54,6 | 57,2 | 56,8 | 56,3 | 55,1 | 53,3 |

Fuente: elaboración propia, con base en: DASGUPTA, S., DREIACK, N., AY, P. Melt crystallization kinetics for enrichment of highly unsaturated fatty acid fractions based on linseedoil. En: Journal of Environmental Research and Development. 2016. Vol.11. No.1. p.4. ISSN 0973 – 6921

4.3 PROPUESTA DE LAS CONDICIONES DE CRISTALIZACIÓN DEL ACEITE DE SACHA INCHI

En esta sección se realizará una estimación de las condiciones y variables del proceso para la concentración de omega-3 del aceite de sachá considerando sus características fisicoquímicas descritas en el capítulo 2. Para esto, se tendrán en cuenta las condiciones presentadas en las investigaciones de la sección anterior sobre la concentración de omega-3 de diferentes aceites similares en su composición de AGPI. Adicional a esto, se presentará un prototipo del sistema de cristalización diseñado para llevar a cabo el proceso a nivel laboratorio el cual tendrá una capacidad de 50mL para realizar la concentración del aceite por el método CF.

4.3.1 Variables. Teniendo en cuenta las variables implicadas en la cristalización fraccionada como la temperatura de pretratamiento de la materia prima, temperatura de operación, velocidad de agitación y tiempo final de cristalización, en la tabla 18 se observan los valores estimados de las variables mencionadas para llevar a cabo el proceso de cristalización del aceite de sachá inchi, teniendo como referencia los valores reportados en los estudios correspondientes al aceite de chía, aceite de pescado y aceite de linaza al tener alto contenido de omega-3 y AGI. Las

características fisicoquímicas del aceite de sachá inchi que se tuvieron en cuenta fueron el punto de fusión y el perfil de ácidos grasos.

Tabla 18. Estimación de las variables de la cristalización fraccionada del aceite de sachá inchi.

| Variable | Valor |
|---|------------|
| Temperatura de pretratamiento de la materia prima | 60-70°C |
| Temperatura de operación | -2 a 3°C |
| Velocidad de agitación | 5-10 rpm |
| Tiempo final de cristalización | 8-12 horas |

Fuente: elaboración propia.

La temperatura de pretratamiento del aceite de sachá inchi antes de iniciar el proceso de cristalización debe estar entre 60°C y 70°C ya que el punto de fusión de los AGS que contiene el aceite se encuentra dentro de este rango como se muestra en la tabla 19. Es importante esta temperatura para garantizar que la muestra de aceite este completamente líquida y que no haya prenucleación.

Tabla 19. Punto de fusión de los ácidos grasos saturados presentes en el aceite de sachá inchi.

| Ácido Graso Saturado | Punto de fusión (°C) |
|----------------------|----------------------|
| Mirístico (C14:0) | 54-58 |
| Palmítico (C16:0) | 63-64 |
| Margárico (C17:0) | 60,85-63 |
| Esteárico (C18:0) | 68,8-70,1 |

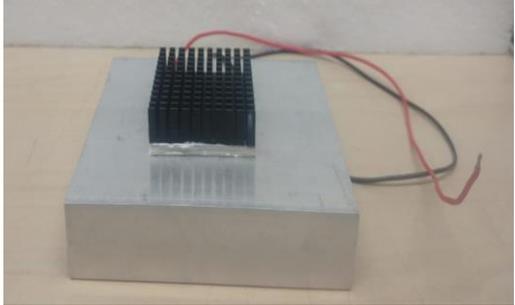
Fuente: elaboración propia, con base en: KNOTHE, Gerhard, DUNN, Robert. A Comprehensive Evaluation of the Melting Points of Fatty Acids and Esters Determined by Differential Scanning Calorimetry. En: Journal of the American Oil Chemists' Society. p. 846.

La temperatura de operación no debe superar el punto de fusión del aceite que según las fuentes consultadas se encuentra entre -9°C a -5°C, debido a que al sobrepasar esta temperatura el aceite de sachá inchi en vez de generar los cristales de AGS, pasará al estado sólido en su totalidad y de esta manera no se podrá llevar a cabo el proceso de separación de las fracciones deseadas. Por lo tanto, se propone un rango de temperatura de operación entre -2°C y 3°C, debido a los resultados reportados en la tabla 17 sobre la concentración de omega-3 en el aceite de linaza, que muestra un aumento en su contenido a estas temperaturas de enfriamiento en comparación con el aceite original.

Cuadro 6. Equipos del prototipo del sistema de cristalización del aceite de sachá inchi a nivel laboratorio.

| Imagen | Características |
|--|---|
| <p data-bbox="526 405 634 436" style="text-align: center;">Nevera</p>  | <p data-bbox="875 457 1455 814">La nevera tiene unas dimensiones de largo*ancho*alto de 55,5cm*27cm*47cm respectivamente. Las propiedades aislantes del icopor permiten que al interior de la nevera se mantenga temperatura de enfriamiento deseada reduciendo pérdidas, además cuenta con unas láminas de madera al exterior ya que este es un excelente aislante térmico debido a su estructura celular.</p> |
| <p data-bbox="483 947 678 978" style="text-align: center;">Cristalizador</p>  | <p data-bbox="875 1094 1455 1419">El cristalizador consta de un tubo exterior de vidrio de 5 cm de diámetro, que dentro tiene un tubo concéntrico de 2,4 cm de diámetro con una capacidad de 50 mL, donde se depositará el aceite. El tubo exterior cuenta con entrada y salida de agua como refrigerante la cual va a circular por el espacio entre ambos tubos para mantener la temperatura requerida.</p> |

Cuadro 6. (Continuación)

| Imagen | Características |
|--|--|
| <p data-bbox="435 380 724 415">Bomba sumergible</p>  | <p data-bbox="873 470 1455 758">La bomba sumergible hace parte del sistema de refrigeración para que haya una recirculación del agua de enfriamiento y de esta manera mantener en frío la muestra de aceite dentro del cristalizador. Esta bomba tiene una tasa de flujo de 80-12 litros por hora con una alimentación de 3-6 voltios.</p> |
| <p data-bbox="483 888 675 924">Celda Peltier</p>  | <p data-bbox="873 890 1455 1283">La celda peltier es un dispositivo termoeléctrico utilizado para enfriar o calentar un objeto bajo el efecto Peltier, que hace referencia a la creación de una diferencia de temperatura debida a un voltaje eléctrico. Las caras están fabricadas en un material cerámico especial para conducir calor, y la celda tiene una temperatura de funcionamiento entre -30°C-70°C, con una potencia de refrigeración de 150W y voltaje de 12V.</p> |
| <p data-bbox="423 1329 737 1365">Disipadores de calor</p>  | <p data-bbox="873 1392 1455 1682">Con el uso de pasta térmica se pega la celda Peltier a unos disipadores de calor, adheridos a ambas caras de la celda. El disipador de la cara caliente es fundamental para que la cara que se enfríe lo haga de manera correcta ya que la celda puede sobrecalentarse y eventualmente dañarse.</p> |

Cuadro 6. (Continuación)

| Imagen | Características |
|---|--|
| <p style="text-align: center;">Ventilador</p>  | <p>Es necesario el uso de un ventilador para retirar el calor que desprende la cara caliente de la celda Peltier. Este es un ventilador que trabaja con 12 voltios y un amperaje de 0,26 A.</p> |
| <p style="text-align: center;">Pilas del gel frío</p>  | <p>Con el objetivo de mantener una temperatura baja dentro de la nevera de icopor, se introducen pilas de polietileno de alta densidad que contienen gel eutéctico, las cuales previamente se congelan y pueden llegar hasta -21°C para garantizar que la temperatura del agua de refrigeración se mantenga en frío.</p> |

Fuente: elaboración propia.

Para el sistema de agitación y de medición de variables se propone hacer uso de los elementos descritos en el cuadro 7. Estos elementos serán fundamentales en el prototipo ya que con estos se podrán registrar y medir las variables más importantes del método, correspondientes a la temperatura de enfriamiento y la agitación en el sistema.

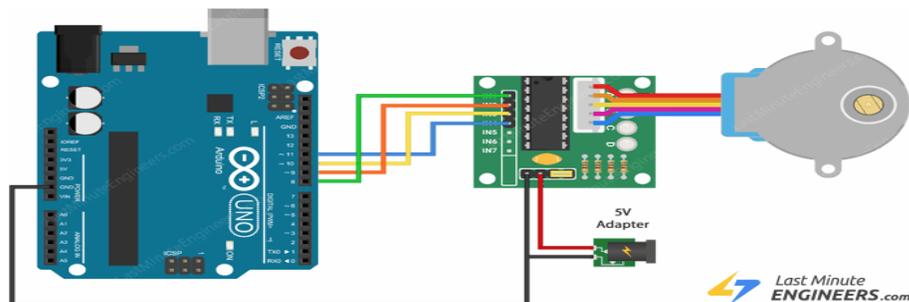
Cuadro 7. Elementos del sistema de agitación y medición de variables del prototipo.

| Imagen | Características |
|---|---|
| <p data-bbox="448 380 732 411" style="text-align: center;">Motor paso a paso</p>  | <p data-bbox="899 380 1453 779">Este es un dispositivo electromecánico que convierte pulsos eléctricos en movimientos mecánicos discretos. La secuencia de los pulsos aplicados se relaciona directamente con la dirección de rotación de los ejes del motor. Este trabaja con una tensión entre 5-12 voltios y tiene un ángulo de paso de 5,6°. El motor puede acoplarse a una varilla con aspas para que funcione como sistema de agitación.</p> |
| <p data-bbox="326 856 854 888" style="text-align: center;">Sensor de temperatura sumergible</p>  | <p data-bbox="899 856 1453 1255">El dispositivo es una sonda de 100 cm que tiene un sensor de temperatura DS18B20 en acero inoxidable el cual se sumerge en la muestra de aceite que se encuentra en el cristalizador para medir su temperatura de enfriamiento. Tiene un rango de suministro de energía de 3 a 5,5 voltios y un rango de temperatura de funcionamiento desde -55°C hasta 125°C.</p> |
| <p data-bbox="488 1297 691 1329" style="text-align: center;">Arduino UNO</p>  | <p data-bbox="899 1297 1453 1755">Arduino es una placa electrónica basada en una plataforma de software libre, que permite programar circuitos electrónicos. Es indispensable su uso en el prototipo que se propone, ya que realizando un código de programación y un circuito electrónico donde el motor de paso y el sensor de temperatura se conectan a la placa, se puede establecer el paso para el motor controlando la agitación y a su vez el valor de la temperatura que registra el sensor.</p> |

Fuente: elaboración propia.

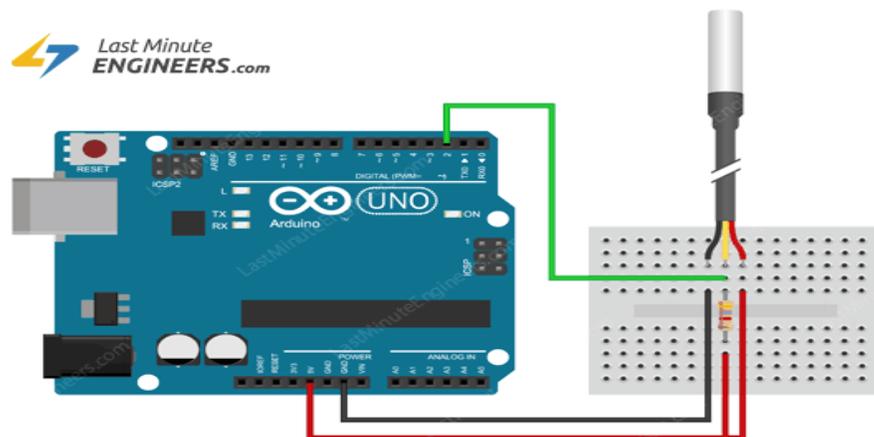
Dicho lo anterior en la imagen 13 y la imagen 14 se puede observar las conexiones requeridas para el sistema de agitación y el sensor de temperatura a la placa electrónica Arduino UNO respectivamente. Estas conexiones facilitan el registro de las variables (agitación y temperatura de operación) el tiempo que se establezca en la programación y de esta manera por medio de un sistema de cómputo o datalogger se podrán ir registrando y guardando los valores para poder realizar las respectivas gráficas, figuras y/o tablas correspondientes a cada ensayo realizado según lo planteado para su posterior análisis en futuros estudios.

Imagen 13. Conexión del motor paso a paso al Arduino UNO.



Fuente: LAST MINUTE ENGINEERS. Control 28BYJ-48 Stepper Motor with ULN2003 Driver & Arduino. [Sitio web]. [Consultado 15, junio, 2020]. Disponible en: <https://lastminuteengineers.com/28byj48-stepper-motor-arduino-tutorial/>

Imagen 14. Conexión del sensor de temperatura sumergible al Arduino UNO.



Fuente: LAST MINUTE ENGINEERS. Interfacing DS18B20 1-Wire Digital Temperature Sensor with Arduino. [Sitio web]. [Consultado 15, junio, 2020]. Disponible en: <https://lastminuteengineers.com/ds18b20-arduino-tutorial/>

En conjunto con todos los elementos propuestos en esta sección, el desarrollo y construcción del prototipo descrito anteriormente facilita la ejecución del método de cristalización fraccionada a nivel laboratorio, debido a que se puede llevar un registro y control de las variables por parte de los investigadores sin tener que depender de los parámetros establecidos que poseen algunos equipos de laboratorio para la ejecución de este método. De igual manera, este prototipo incurre en la fabricación de un equipo a pequeña escala con control de variables de acuerdo con la necesidad de la investigación.

5. ANÁLISIS FINANCIERO A NIVEL PLANTA PILOTO

Todos los procesos que se realizan tanto industrialmente como a nivel laboratorio tienen asociado un valor monetario, es por esta razón la importancia de realizar un análisis financiero. El método de cristalización fraccionada el cual fue seleccionado por medio de la matriz de decisión no es la excepción, y por tal motivo en este capítulo se estimarán los costos asociados a la inversión que incluye la compra de maquinaria y equipos y los costos de operación que hacen referencia a los costos de materia prima, costos de mano de obra, costo de análisis y costos energéticos, con el fin de determinar los costos totales de la puesta en marcha del método de cristalización fraccionada a nivel planta piloto con un volumen de alimento mensual de 327 litros. Adicional a lo anterior, por medio del valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR) se realiza un estudio financiero para evaluar la viabilidad del proyecto.

5.1 COSTOS DE INVERSIÓN

Los costos de inversión hacen referencia a la adquisición y compra de los diferentes equipos que se necesitan para poder poner en marcha el método de cristalización fraccionada a nivel planta piloto. Se debe tener en cuenta que estos costos se van a considerar solamente durante el primer mes, debido a que pasado este primer mes los costos asociados al método será los costos correspondientes a los costos de operación.

5.1.1 Costos de equipos. Para la puesta en marcha del método de cristalización fraccionada a nivel planta piloto se requieren diferentes equipos tales como: un tanque de agitación con calentamiento para el pretratamiento, un tanque de enfriamiento con agitación para la cristalización y un filtro para separar los productos obtenidos. En la tabla 20 se muestran los equipos mencionados anteriormente, en donde se indica tanto la cantidad requerida como el costo de cada uno de ellos. Los precios asociados a estos equipos se pueden observar en las cotizaciones realizadas que se encuentran en el anexo A. El tanque de agitación con calentamiento trabaja a una temperatura entre -50°C a 600°C (PT100) con una agitación entre 10-350 rpm, mientras que el tanque de enfriamiento con agitación opera a una temperatura $\leq 1^{\circ}\text{C}$ a una velocidad de agitación variable hasta 36 rpm. La capacidad de estos equipos corresponde a 50 litros cada uno a pesar de que la cantidad a procesar diaria de aceite es de 14 litros aproximadamente, es decir, se ocupará un 28% de la capacidad de los tanques inicialmente, debido a que se proyecta aumentar el volumen de producción de la planta transcurrido 2 años de operación, con el fin de ocupar el 90% de la capacidad de los tanques sin la necesidad de volver a adquirir estos equipos, lo cual incurriría en gastos adicionales a futuro.

Tabla 20. Costos de adquisición de equipos.

| Equipo | Cantidad | Costo (COP) |
|---|-----------------|---------------------|
| Tanque de agitación con calentamiento eléctrico de 50L ¹⁵² | 1 | \$15.533.055 |
| Tanque de enfriamiento con agitación de 50L ¹⁵³ | 1 | \$3.778.647 |
| Filtro prensa | 1 | \$7.236.480 |
| Total | | \$26.548.182 |

Fuente: elaboración propia.

Se calcula un costo de inversión inicial de \$26.548.182 (COP) para la puesta en marcha del método de cristalización fraccionada. Este costo total de inversión no tiene en cuenta el IVA (19%). Cabe mencionar que el tanque de enfriamiento incluye el sistema de medición de temperatura.

5.2 COSTOS DE OPERACIÓN

Los costos de operación son los costos asociados a la materia prima requerida para el método, al consumo energético de los diferentes equipos involucrados, los análisis fisicoquímicos y microbiológicos que se deban realizar tanto a la materia prima como al producto terminado y por último la mano de obra requerida en la ejecución del método, el cual corresponde al pago o remuneración de los trabajadores que estarán encargados del proceso.

5.2.1 Costos de materia prima. El método de cristalización fraccionada tiene únicamente como materia prima el aceite virgen de sachá inchi. El aceite virgen de sachá inchi tiene un valor de compra de \$60.000 COP el litro por parte de la empresa BioRefinería S.A.S.

Teniendo en cuenta lo anterior en la tabla 21 se puede observar el valor mensual correspondiente a los costos asociados a materia prima.

¹⁵² INQXI. Tanque de Agitación Calentamiento Eléctrico de 50L. [Sitio web]. [Consultado 29, junio, 2020]. Disponible en: https://www.inoximexico.com/catalog/default/product?id=404&alias=tanque-de-agitacion-de-50-litros_calentamiento-electrico

¹⁵³ ALIBABA. 50L de refrigeración de leche máquina utilizada tanque de enfriamiento de leche para la venta. [Sitio web]. [Consultado 29, junio, 2020]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/50l-milk-cooling-machine-used-milk-cooling-tank-price-for-sale-1892952012.html>

Tabla 21. Costos mensuales de materia prima.

| Materia prima | Cantidad | Costo (COP) |
|------------------------------|----------|--------------|
| Aceite virgen de sachá inchi | 327 L | \$19.620.000 |

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta información suministrada por la empresa, se sabe que por 1 hectárea (10.000 m²) de sachá inchi se producen 6.000 kilos de fruto, los cuales generan un total de 980 litros de aceite virgen de sachá inchi al año. Por lo tanto, se destinarán 4 hectáreas para la planta piloto. Por tal razón el total anual que se va a procesar de aceite será de 3.920 litros el cual se distribuirá en los 12 meses dando un valor de 327 litros mensual aproximadamente, es decir, los costos asociados mensualmente para la compra de la materia prima corresponderían a \$19.620.000.

5.2.2 Costos energéticos. Los costos de energía hacen referencia a la cantidad de energía en kWh consumida por los diferentes equipos mencionados en la tabla 20 según su tiempo de funcionamiento durante el proceso. En la tabla 22 se muestra el respectivo voltaje (V) y amperios (A) a los que trabaja cada equipo. Con estos valores se puede calcular los kWh consumidos para cada equipo que procesa un lote de aceite concentrado en un día con un tiempo de trabajo de 12 horas.

Tabla 22. Especificaciones técnicas y tiempo de trabajo de los equipos.

| Equipo | Voltaje (V) | Amperios (A) | Watts (W) | kW | Tiempo (h) | kWh |
|--|-------------|--------------|-----------|------|------------|------|
| Tanque de agitación con calentamiento eléctrico de 50L | 240 | 16,67 | 4.000 | 4,0 | 1(*) | 4,0 |
| Tanque de enfriamiento con agitación de 50 L | 380 | 6,71 | 2.550 | 2,55 | 12 | 30,6 |
| Filtro prensa | 380 | 5,790 | 2.200 | 2,2 | 1(*) | 2,2 |

Fuente: elaboración propia.

(*) Se toma 1 hora para estos equipos debido a que se utilizan solo para el pretratamiento de la materia prima y la filtración al finalizar el método de cristalización.

Como ya se había mencionado previamente se procesarán 327 litros mensualmente, por lo cual se debe conocer el costo de cada equipo que opera en ese tiempo. En la tabla 23 se puede observar el costo (\$COP) energético que

genera cada equipo tanto diario como mensualmente. Estos datos se obtienen teniendo en cuenta la tarifa de energía eléctrica de la planta de BioRefinería S.A.S la cual tiene un equivalente a 556 \$/kWh. Cabe resaltar que el cálculo del costo de energía se realiza asumiendo un uso mensual de los equipos en donde se trabaja 24 días al mes, 6 días por semana y cada día se tiene un funcionamiento de los equipos de 12 horas, es decir, se realiza un lote de aceite concentrado por día de 14 litros aproximadamente. Para hallar el costo diario de cada equipo se hace uso de la ecuación 10.

Ecuación 10. Costo energético diario del equipo en \$COP

$$CD = kWh \times TE$$

Donde:

CD = Costo que genera diariamente el equipo (\$COP/día).

kWh = Cantidad de kilowatts hora que consume el equipo (kWh).

TE = Corresponde a la tarifa energética a la cual se paga cada kWh en la planta (\$/kWh).

Como ejemplo se toma el tanque de enfriamiento el cual se puede observar a continuación:

$$CD \text{ tanque enfriamiento} = 30,6 \text{ kWh} \times \frac{\$556}{\text{kWh}}$$

$$CD \text{ tanque enfriamiento} = \$17.014/\text{día}$$

El valor resultante de la ecuación 10 entrega un valor de costo diario debido a que por día solamente se trabaja 12 horas en el método de cristalización fraccionada. Con este valor hallado y con la ecuación 11 se logra establecer el valor mensual de cada equipo sabiendo que se trabaja 24 días al mes.

Ecuación 11. Costo mensual energético del equipo en \$COP

$$\text{Costo mensual} = CD \times DTM$$

Donde:

Costo mensual = Costo generado mensualmente por el equipo (\$COP/mes).

CD = Costo que genera diariamente el equipo (\$COP/día).

DTM = Corresponde a los días trabajados en el mes.

Continuando con el ejemplo del tanque de enfriamiento se tendría:

$$\text{Costo mensual tanque enfriamiento} = \frac{\$17.014}{\text{día}} \times \frac{24 \text{ días}}{\text{mes}}$$

$$\text{Costo mensual tanque enfriamiento} = \frac{\$408.326}{\text{mes}}$$

El procedimiento anterior se realizó para cada equipo involucrado en el método de cristalización fraccionada para determinar el gasto de energía asociado a cada equipo, los cuales se presentan en la tabla 23. Conociendo el costo de cada equipo se procede a determinar el valor de los costos energéticos totales mensuales.

Tabla 23. Costos mensuales asociados al consumo energético de los equipos.

| Equipo | kWh | Valor (\$/kWh) | Costo diario (\$COP) | Días trabajados al mes | Costo mensual (\$COP) |
|--|------|----------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| Tanque de enfriamiento con agitación (50 L) | 30,6 | 556 | 17.014 | 24 | \$408.326 |
| Tanque de agitación con calentamiento eléctrico de 50L | 4,0 | 556 | 2.224 | 24 | \$53.376 |
| Filtro prensa | 2,2 | 556 | 1.223,2 | 24 | \$29.357 |
| Total | | | | | \$491.059 |

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta los equipos necesarios para el método de cristalización fraccionada, se determina que el costo energético mensual es de un valor de \$491.059.

5.2.3 Costos de mano de obra. Para el proceso de cristalización fraccionada a nivel planta piloto se estima el gasto de mano de obra con respecto a las actividades que realice el trabajador mensualmente en la puesta en marcha del método. Dicho lo anterior en el cuadro 8 se puede observar las tareas y/o funciones que debe realizar el trabajador durante su jornada laboral.

Cuadro 8. Funciones del trabajador.

| Funciones |
|--|
| Recepción de turno |
| Recepción materia prima (una vez al mes) |
| Muestreo materia prima (una vez al mes) |
| Limpieza tanque de calentamiento |
| Limpieza filtro prensa |
| Limpieza sistema agitación |
| Limpieza tanque enfriamiento |
| Ajustes necesarios para el correcto funcionamiento de la máquina y el método |
| Puesta en marcha del cristalizador |
| Control y medición variables |
| Muestreo producto final |
| Envío de muestras para análisis fisicoquímicos y microbiológicos |
| Informe de entrega de turno |

Fuente: elaboración propia.

En Colombia la duración máxima de la jornada ordinaria de trabajo es de ocho (8) horas al día y cuarenta y ocho (48) a la semana,¹⁵⁴ por tal razón es necesario contratar a 2 trabajadores para poder cumplir con las 12 horas establecidas del método y que los trabajadores estén presentes durante el proceso y de igual manera estar pendientes de cualquier eventualidad que pudiese ocurrir.

La remuneración que recibirá cada trabajador será de un salario mínimo legal vigente de Colombia el cual según el decreto 2360 de 2019 fija a partir del primero (1) de enero de 2020 como salario mínimo legal mensual, la suma de ochocientos setenta y siete mil ochocientos tres pesos (\$877.803).¹⁵⁵ Dicho lo anterior en la tabla 24 muestra el valor total que debe asumir la empresa por la prestación del servicio por parte de los trabajadores.

¹⁵⁴ MINISTERIO DE TRABAJO. Decreto 2663 (05 agosto de 1950). Por el cual decreta el código sustantivo del trabajo. [En línea]. Santa Fe de Bogotá, D.C: El Ministerio, 1950. [Consultado 25, junio, 2020]. Disponible en:

http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/codigo_sustantivo_trabajo.html

¹⁵⁵ MINISTERIO DE TRABAJO. Decreto 2360 (26 diciembre de 2019). Por el cual se fija el salario mínimo mensual legal. [En línea]. Santa Fe de Bogotá, D.C: El Ministerio, 2019. 4 p. [Consultado 25, junio, 2020]. Disponible en: <https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO%202360%20%20DEL%2026%20DICIEMBRE%20DE%202019.pdf>

Tabla 24. Costos de mano de obra.

| Concepto | Valor mensual |
|------------------------|----------------------|
| Salario base | \$877.803 |
| Auxilio transporte | \$102.852 |
| Salud (8,5%) | \$74.613 |
| Pensión (12%) | \$105.336 |
| ARL (IV) 4,350% | \$38.184 |
| Parafiscales | |
| SENA (2%) | \$17.557 |
| ICBF (3%) | \$26.334 |
| Caja compensación (4%) | \$35.112 |
| Total | \$1.277.791 |

Fuente: elaboración propia.

Como ya se había mencionado anteriormente, son necesarios 2 trabajadores para dar cumplimiento con las horas de trabajo en el transcurso del método, por tal razón se establece que el costo total de la mano de obra es \$2.555.582.

5.2.4 Costos de análisis. Para poder realizar la concentración del aceite virgen de sacha inchi se deben realizar análisis tanto fisicoquímicos como microbiológicos a la materia prima y al producto terminado (aceite concentrado). Estos análisis tienen asociados unos costos, los cuales asume la empresa y se realizan con entidades externas especializadas en el área. En la tabla 25 se pueden observar los análisis específicos que se realizan tanto fisicoquímicos como microbiológicos con sus costos asociados.

Tabla 25. Costos de análisis fisicoquímicos y microbiológicos semanal.

| | Análisis | Costo (COP) |
|----------------|-------------------------------------|--------------------|
| Fisicoquímicos | Perfil ácido graso | |
| | Densidad | |
| | Índice de acidez | \$840.000 |
| | Índice de peróxidos | |
| Microbiológico | Índice saponificación | |
| | Mesófilos | |
| | <i>Stapylococcus</i> | |
| | Mohos | |
| | Levaduras | \$420.000 |
| | Enterobacterias | |
| | <i>Salmonella</i> <i>E. Coli</i> | |
| Total | \$1.260.000 | |

Fuente: elaboración propia.

Los análisis que se muestran en la tabla se realizaran a la materia prima que se adquiere iniciando cada mes, es decir, una análisis fisicoquímico y microbiológico por mes para la materia prima. De igual manera al finalizar cada semana se realizará un muestreo del aceite concentrado para enviar las muestras y realizar sus respectivos análisis, es decir, se realizarán 4 análisis para el producto terminado por mes. Teniendo en cuenta los análisis de producto terminado y materia prima, se realizarán un total de 5 análisis por mes. Estos análisis tendrían un costo total de \$6.300.000.

5.3 COSTOS TOTALES

Los costos totales que requiere el método son la suma de los costos operacionales y los costos de inversión. En la tabla 26 se puede observar el costo total que tendría la planta piloto para poder concentrar aceite virgen de sachá inchi por el método de cristalización fraccionada. Cabe mencionar que estos costos están asociados a valores mensuales, por tal motivo serían los valores iniciales para poder en funcionamiento la planta piloto.

Tabla 26. Costos totales mensuales de la planta piloto.

| Costos | Valor mensual (COP) |
|---|----------------------------|
| Materia prima | \$19.620.000 |
| Equipos | \$26.548.182 |
| Energéticos (equipos) | \$491.059 |
| Análisis fisicoquímicos y microbiológicos | \$6.300.000 |
| Mano de obra | \$2.555.582 |
| Total | \$55.514.823 |

Fuente: elaboración propia.

Los costos asociados a equipos serán tenidos en cuenta solamente como un costo de inversión, por tal razón este gasto no se incluirá en los otros gastos mensuales (costos operación), únicamente se tendrán en cuenta para la puesta en marcha y montaje de la planta piloto.

5.4 ESTUDIO DEL VALOR PRESENTE NETO (VPN)

Para evaluar la viabilidad del proyecto a nivel planta piloto se realizó un estudio del valor presente neto (VPN), el cual es un método financiero para evaluar proyectos de inversión a largo plazo. El valor de VPN se calcula con la ecuación 12 en donde se tiene en cuenta el flujo neto de caja mensual, la tasa de oportunidad, la inversión inicial y el número de periodos que dure el proyecto. Para el flujo neto de caja mensual se tuvieron en cuenta los valores asociados a los costos de operación de

la sección anterior en un tiempo estimado de 24 meses, en donde la tasa de interés mensual efectiva estimada es de 3,14%.

Ecuación 12. Fórmula valor presente neto (VPN).

$$VPN = -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_o + \frac{F_1}{(1+k)^1} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n}$$

Fuente: INSTITUTO EUROPEO DE POSGRADOS. Que es VPN en finanzas. [Sitio web]. [Consultado 30, junio, 2020] Disponible en: <https://www.iep-edu.com.co/que-es-vpn-en-finanzas/>

Donde:

I_o : Inversión inicial previa el cual corresponde al monto o valor del desembolso que la empresa hará en el momento inicial de efectuar la inversión.

F_t : Flujos netos de efectivo el cual representan la diferencia entre los ingresos y gastos que podrán obtenerse por la ejecución de un proyecto de inversión durante su vida útil.

k : Tasa de descuento o también conocida como costo o tasa de oportunidad es la tasa de retorno requerida sobre una inversión. Refleja la oportunidad perdida de gastar o invertir en el presente.

n : Número de periodos que dure el proyecto.

Para el análisis financiero del proyecto que se encuentra en el anexo B de este documento, se asumió un porcentaje de interés de utilidad correspondiente al 32%, mientras que la depreciación de los equipos se realizó de manera lineal para un periodo de 24 meses, correspondientes al tiempo de evaluación del proyecto. Se estima un valor de venta del aceite concentrado de omega-3 de \$30.000 COP para una botella de 250mL, este valor se establece debido a que el producto final será un alimento funcional y su valor incrementará en comparación con el aceite virgen de sachá inchi que se encuentra en el mercado, el cual tiene un valor de \$24.000 COP para la presentación de 250mL. Como ya se había mencionado previamente en los costos de materia prima, la cantidad mensual a procesar es de 327L, de los cuales un 95% (310,65 L) de esta cantidad será aceite concentrado mientras que el otro 5% (16,35 L) será la cantidad de fracción sólida que se genera al finalizar el método de cristalización fraccionada. Dicho lo anterior, las ventas mensuales corresponderán al 95% del producto final (aceite de sachá inchi concentrado), lo cual generará unos ingresos mensuales de \$ 37.278.000 para el primer mes estimando un incremento mensual de estas ventas del 1%. Por otra parte, los costos de operación se mantienen constantes para el primer año con un valor de

\$28.966.641 y pasado el primer año, se estima un incremento del 10% para estos gastos hasta finalizar los 24 meses de estudio del proyecto.

Teniendo en cuenta el flujo neto de caja de cada mes, la inversión inicial del proyecto tiene una recuperación aproximadamente en el sexto mes y el VPN para este proyecto tendrá un valor positivo de \$82.170.053. De igual manera, al calcular la tasa interna de retorno (TIR) la cual tuvo un valor del 21% y al compararla con el porcentaje de interés que se definió como el más seguro, se determina que la TIR es mayor a la tasa de descuento, lo cual indica que es conveniente realizar la inversión y se obtendrán beneficios a largo plazo.

6. CONCLUSIONES

- Se determinaron las propiedades fisicoquímicas del aceite virgen de sachá inchi proporcionado por la empresa BioRefinería S.A.S, las cuales se encuentran dentro de los parámetros establecidos según la Resolución 2154 de 2012 dada en Bogotá, sobre las características de calidad que deben cumplir los aceites vegetales. De igual manera, se compararon los valores obtenidos con la Norma Técnica Peruana NTP 151.400 de 2014 para el aceite de sachá inchi, ya que actualmente en Colombia no existe una norma específica que mencione los requisitos de este aceite. Los resultados en cuanto a acidez libre, índice de acidez e impurezas insolubles mostraron que el aceite es de alta calidad y que al tener un bajo contenido de ácidos grasos libres e impurezas no es propenso a sufrir oxidación. Adicional a esto se corroboró con el índice de yodo que el aceite tiene un alto grado de insaturaciones, que según el perfil lipídico obtenido de fuentes bibliográficas corresponden a los ácidos grasos poliinsaturados omega-3 y omega-6, lo cual hace que el aceite de sachá inchi pueda tener aplicación en el sector alimentario debido a los beneficios asociados a su consumo.
- Por medio de una matriz de decisión y una recopilación bibliográfica de los diferentes métodos de concentración de ácidos grasos poliinsaturados presentes en aceites, se logró establecer el método de cristalización fraccionada como el método más adecuado para concentrar el aceite virgen de sachá inchi como fuente de omega-3, siendo este un método amigable con el medio ambiente al no requerir del uso de solventes ni reactivos, lo cual a su vez permite conservar las propiedades naturales del aceite. Este método no requiere de un proceso complejo para adecuar la materia prima antes de iniciar la cristalización y es fácilmente escalable, pese a requerir de largos tiempos de procesamiento.
- Se establecieron las especificaciones técnicas de la cristalización fraccionada de aceites por medio de una recopilación de estudios y artículos relacionados con el método, siendo la temperatura de pretratamiento de la materia prima, la temperatura de operación del proceso, la velocidad de agitación y el tiempo final de cristalización las variables más importantes que se deben tener en cuenta durante el procesamiento del aceite. Según los valores reportados en los diferentes estudios, se estimaron los valores de las variables para la cristalización del aceite de sachá inchi, obteniendo de esta manera unos rangos estimados de 60-70°C para la temperatura de pretratamiento, una temperatura de operación entre -2 y 3°C, una velocidad de agitación entre 5 y 10 rpm y un tiempo final de cristalización entre 8 y 12 horas.

- Se realizó un análisis financiero del método de cristalización fraccionada para el aceite virgen de sachá inchi a nivel planta piloto teniendo en cuenta los costos de inversión relacionados con la adquisición de equipos y los costos de operación que incluye la compra materia prima, mano de obra de los trabajadores, costos energéticos según el consumo de los equipos y costos de análisis fisicoquímicos y microbiológicos tanto para la materia prima como para el aceite concentrado. A través del modelo financiero del valor presente neto (VPN) y de la tasa interna de retorno (TIR), se evaluó la viabilidad financiera del proyecto a un periodo de 24 meses dando un valor positivo para el VPN de \$82.170.053 y una TIR del 21% lo que indica que el proyecto es viable y generará beneficios a largo plazo.

7. RECOMENDACIONES

- Realizar una caracterización del aceite virgen de sachá inchi a nivel laboratorio del punto de fusión y punto de humo, con el fin de obtener más datos sobre estas características debido a la poca información que se encuentra en referentes bibliográficos. De igual manera, realizar el perfil lipídico del aceite usando otras técnicas distintas a las cromatográficas debido a su alto costo, como la espectroscopia infrarroja para la cualificación y cuantificación de los ácidos grasos presentes en la muestra de aceite.
- Realizar un desarrollo experimental según los rangos de las variables que se estimaron para la cristalización del aceite de sachá inchi a nivel laboratorio con equipos que se adapten a estas condiciones o con el prototipo propuesto en este trabajo, donde se propongan diferentes niveles para cada variable y de esta manera poder determinar las mejores condiciones de operación para incrementar la cantidad de omega-3 del aceite por el método de cristalización fraccionada.
- Realizar la técnica de calorimetría diferencial de barrido para el aceite de sachá inchi, con el fin de conocer la concentración de la fracción sólida correspondiente a los cristales en función de la temperatura de operación y así determinar la temperatura adecuada de cristalización.
- Elaborar el prototipo propuesto en este documento en conjunto con otras ramas del conocimiento implementando sistemas electrónicos y de programación con el fin de poder desarrollar un proceso estandarizado y controlado, llevando de esta manera el método propuesto a un nivel de ejecución interdisciplinar.
- Ejecutar el método de cristalización fraccionada para el aceite virgen de sachá inchi con y sin pretratamiento de calentamiento a la materia prima, con el fin de poder determinar que tanto varía la concentración final de omega-3 en el aceite obtenido para poder retirar el equipo de calentamiento y disminuir costos de inversión y de energía siempre y cuando el cambio de concentración final no supere el 1%.
- Desarrollar productos alimentarios y/o cosméticos a partir de la fracción líquida y la fracción sólida producto del método de cristalización fraccionada del aceite de sachá inchi según sus características fisicoquímicas, con el objetivo de aprovechar los productos obtenidos y evitar residuos.

- Realizar otro tipo de diseño experimental para la concentración de omega-3 del aceite de sacha inchi por el método de formación de complejos de urea debido a que también posee un gran potencial en su ejecución, lo cual se evidencia en la matriz elaborada en este trabajo llegando a competir y obtener valores de selección muy cercanos a los de la cristalización fraccionada, por lo cual resulta conveniente profundizar en este método.

BIBLIOGRAFÍA

AIRES, Davis., CAPDEVILA, Nuria., SEGUNDO, María. Ácidos grasos esenciales, su influencia en las diferentes etapas de la vida. En: OFFARM. Revista de la oficina de farmacia. 2005. Vol.24. No.4. p.1.

ALAYÓN, Alicia., ECHEVERRI, Isabella. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis Hnneo*): ¿una experiencia ancestral desaprovechada? Evidencias clínicas asociadas a su consumo. En: Revista Chilena de Nutrición. 2016. Vol.43. No.2. p. 167. ISSN 0717-7518

ALIBABA. 50L de refrigeración de leche máquina utilizada tanque de enfriamiento de leche para la venta. [Sitio web]. [Consultado 29, junio, 2020]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/50l-milk-cooling-machine-used-milk-cooling-tank-price-for-sale-1892952012.html>

ARIAS. Martha, BARRA, Diana. Saponificación artesanal de aceites de cocina usados, provenientes del municipio de Charalá. Documentos De Trabajo ECAPMA. 2018. Vol. 2. No.1.

AYALA, Guillermo. Análisis de crecimiento y producción de 3 variedades de sachá inchi (*Plukenetia volubilis L.*), en el municipio de Tena Cundinamarca. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad de ciencias aplicadas y ambientales U.D.C.A, Bogotá D.C: 2016. pp.13-14. [Consultado 10, abril, 2020] Disponible en: <https://repository.udca.edu.co/bitstream/11158/487/1/TESIS%20SACHA%20INCHI.pdf>

BADAN, Ana, et al. Crystallization modifiers in lipid systems. En: Association of Food Scientists & Technologists (India). 2014. p. 3926.

BENVENUTO, Rodrigo. Estudio de la dinámica de cristalización de tres aceites de interés industrial, y caracterización de su microestructura final. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad de Chile. Santiago, Chile: 2017. p.9. [Consultado 08, junio, 2020]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/>

BONILLA, Jeimmy., HOYOS, José. Métodos de extracción, refinación y concentración de aceite de pescado como fuente de ácido grasos omega-3. En: Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria. 2018. Vol.19. No.3. p. 637. ISSN: 0122-8706.

BRAGAGNINI, Virginia, MAGNANI, Ezequiel. Fraccionamiento con urea de ésteres de ácidos grasos obtenidos por transesterificación de aceites vegetales. [En línea]. Universidad Tecnológica Nacional. [Consultado 05, junio, 2020]. Disponible en: <http://ria.utn.edu.ar/>

CARBAJAL, Ángeles. Manual de nutrición y dietética. [En línea]. Universidad Complutense de Madrid. Madrid: 2013. p.1. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://eprints.ucm.es/22755/1/Manual-nutricion-dietetica-CARBAJAL.pdf/>

CARDONA, Carlos., ORREGO, Carlos. Avances investigativos en la producción de biocombustibles. Universidad Nacional de Colombia. Parte 3. p.72. ISBN 978-958-44-5261-0

CASTAÑO, Diego, et al. Composición de ácidos grasos de sacha inchi (*Plukenetia volubilis linneo*) y su relación con la bioactividad del vegetal. En: Revista Chilena de Nutrición. 2012. Vol.39. No.1. p.50.

CEDANO. José., RODRÍGUEZ, Alicia., SICHE, Raúl. Maximización del contenido de Omega-3 (EPA y DHA) en el proceso de acidólisis enzimática de aceite de canola y concentrado de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga (AGPICL), en condiciones de CO₂ supercrítico. En: Scientia Agropecuaria. 2015. Vol. 6. No. 4. p 319. ISSN 2306-6741

CHIRINOS, Rosana, et al. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis*): A seed source of polyunsaturated fatty acids, tocopherols, phytosterols, phenolic compounds and antioxidant capacity. En: Food Chemistry. 2013. Vol. 141. No. 3. p.1734.

DASGUPTA, S., DREIACK, N., AY, P. Melt crystallization kinetics for enrichment of highly unsaturated fatty acid fractions based on linseedoil. En: Journal of Environmental Research and Development. 2016. Vol.11. No.1. p.2. ISSN 0973 – 6921

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE). Censo Nacional Agropecuario 2014. [Sitio web]. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/files/CensoAgropecuario/entrega-definitiva/Boletin-9-cultivos/9-presentacion.pdf>

ECURED. Aceite vegetal. [Sitio web]. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Aceite_vegetal

FEDEPALMA. Perfil de ácidos grasos de los diferentes aceites más usados en la preparación de los alimentos y recomendaciones de consumo. [Sitio web]. [Consultado 03, junio, 2020]. Disponible en: <https://lapalmaesvida.com/salud/perfil-de-acidos-grasos-de-los-diferentes-aceites-mas-usados-en-la-preparacion-de-los-alimentos-y-recomendaciones-de-consumo/>

FONTENELE, Maria, et al. Advances in lipids crystallization technology. En: INTECH. 2015. Capítulo 3. p. 106.

FOODLAB. Análisis de acidez en aceites y grasas comestibles. [Sitio web]. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.cdrfoodlab.es/alimentos-bebidas-analisis/acidez-aceite-grasas/>

FRAGAN, Peter; WIJESUNDERA, Chakra. Rapid isolation of omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids using monolithic high performance liquid chromatography columns. En: Journal of Separation Science. 2013. Vol 36. Issue 11.p 1748. ISSN: 1615-9314

FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA EL DESARROLLO DE LA NUTRICIÓN ANIMAL. Índice de peróxidos. [Sitio web]. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: http://www.fundacionfedna.org/tecnicas_de_analisis/%C3%ADndice-per%C3%B3xidos

FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA EL DESARROLLO DE LA NUTRICIÓN ANIMAL. Moisture, Impurities, Unsaponifiable (MIU). Impurezas Insolubles. [Sitio web]. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: http://www.fundacionfedna.org/tecnicas_de_analisis/miu-moisture-impurities-unsaponifiable-impurezas-insolubles

GARCÍA, Eva., FERNÁNDEZ, Isabel., FUENTES, Ana. Determinación del enranciamiento hidrolítico de un aceite de oliva mediante el grado de acidez. [En línea]. Universidad Politécnica de Valencia. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/b710/007769396cb87162320f87f3d2621bf6baf8.pdf>

GILLESPIE, Lynn. A Synopsis of Neotropical *Plukenetia* (*Euphorbiaceae*) Including Two New Species. En: American Society of Plant Taxonomists. 1993. Vol.18.No. 4. p.576.

GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA. Cundinamarca apoya la comercialización del Sacha inchi. 2019. [Sitio web]. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <http://www.cundinamarca.gov.co/Home/prensa2018/asnoticiasprensa/cundinamarca+poya+la+comercializacion+del+sacha+inchi>

GÓMEZ, Rocío. 10 alimentos con Omega-3 esenciales para nuestra salud. En: Sanitas. España: 2018. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://muysaludable.sanitas.es/nutricion/10-alimentos-omega-3-esenciales-nuestra-salud/>

GONZÁLES, Jesús. Unidad 7: Lípidos. [En línea]. Instituto Tecnológico de la Paz. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.coursehero.com/sitemap/schools/66019-Technological-Institute-of-La-Paz/departments/739487-BIOCHEMISTRY/>

GRALCO S.A. Omega-3. [Sitio web]. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: https://www.gralco.com.co/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=155

GRASAS Y ACEITES COMESTIBLES. Índice de refracción. [En línea]. Universidad de Antioquia. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <http://docencia.udea.edu.co/qf/grasas/refraccion.html>

GUPTA, Monoj K. Winterization and fractionation of selected vegetable oils. En: Practical guide to vegetable oils processing. En: AOCS Press. 2017. Capítulo 11. p. 294.

GUTIERREZ, A. Apéndice A - descripción de análisis del aceite. [En línea]. Universidad de las Américas Puebla. p.76. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mepi/gutierrez_a_ba/apendiceA.pdf

GUTIERREZ, Luis., ROSADA, Lina., JIMÉNEZ, Álvaro. Chemical composition of Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) seeds and characteristics of their lipid fraction. En: Grasas y Aceites. 2011. Vol. 62. No. 1. p. 82.

GUTIERREZ, Nelson., SAÁ, Irene., VINUEZA, Alexy. Diseño y construcción de un prototipo para la extracción continua de aceite de la semilla Sacha Inchi con un proceso de prensado en frío. En: Enfoque UTE. 2017. Vol.8. No.2. p.18.

HANSEN, Hans., SCHMITZ, Markus. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) Nut Oil and Its Therapeutic and Nutritional Uses. En: Nuts & Seeds in Health and Disease Prevention. 2011. Capítulo 117. p.993.

HENDRIX, Marc. Fraccionamiento en seco del aceite y de los ácidos grasos del palmiste para los productos de alto valor agregado. En: Revista Palmas. 2010. Vol. 31. No. Especial. p.317.

HERNANDEZ, María. Determinación del índice de saponificación en aceite de maíz usando una lipasa de procedencia nacional. [En línea]. Trabajo Especial de Grado Licenciatura en Química. Universidad de los Andes. Mérida: 2017. [Consultado 06, junio, 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Cristobal_Larez_Velasquez/publication/320622547_Determinacion_del_indice_de_saponificacion_en_aceite_de_maiz_usando_una_lipasa_de_procedencia_nacional/links/59f1cd97a6fdcc1dc7b92469/Determinacion-del-indice-de-saponificacion-en-aceite-de-maiz-usando-una-lipasa-de-procedencia-nacional.pdf

HERRERA, María. El polimorfismo en sistemas grasos y sus aplicaciones tecnológicas. [En línea]. Universidad de Buenos Aires. [Consultado 05, junio, 2020]. Disponible en: https://www.ib.edu.ar/aacr2019/wp-content/uploads/2020/01/taller_6_Herrera_CongresoAACr2019_Polimorfismo-sistemas-grasos.pdf

HERRERA, Mayra, et.al. Metodología para la extracción, identificación y cuantificación de ácidos grasos en la dieta y leche de cabras. [En línea]. [Consultado el 3, junio, 2020] Disponible en: <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/metoAcidosGLEche.pdf>

HOMAYOONI, B., SAHARI, Mohammad., BARZEGAR, Mohsen. Concentrations of omega-3 fatty acids from rainbow sardine fish oil by various methods. En: International Food Research Journal. 2014. Vol. 21. Issue 1. p 746. ISSN: 2231 7546

HUERTA, Sergio. Cristalización. [Diapositivas]. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México. Diapositiva 12. [Consultado 08, junio, 2020]. Disponible en: <http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/sho/Cristalizacion.pdf>

HURTADO, Zully. Análisis composicional de la torta y aceite de semillas de sacha inchi (*Plukenetia volubilis*) cultivada en Colombia. [En línea]. Trabajo de investigación Magister en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Colombia, Palmira: 2013. p.22. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/12689/1/7609501.2013.pdf>

IBAÑEZ, Jose. Fortalecimiento socioempresarial y adecuación financiera. [En línea]. En: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI. 2017. p.28. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: https://sinchi.org.co/files/gef/PUBLICACIONES/1.%20Fortalecimiento%20Socioempresarial%20ASOPROAGRO_compressed.pdf

INKANATURAL. Aceite de Sacha inchi. [Sitio web]. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.inkanatural.com/es/arti.asp?ref=aceite-de-sacha-inchi%20>

INQXI. Tanque de Agitación Calentamiento Eléctrico de 50L. [Sitio web]. [Consultado 29, junio, 2020]. Disponible en: https://www.inoximexico.com/catalog/default/product?id=404&alias=tanque-de-agitacion-de-50-litros_calentamiento-electrico

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del índice de saponificación. NTC 335:2019. Bogotá, D.C: El instituto.12p.

_____. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

_____. Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del contenido de humedad y materia volátil. NTC 287:2018. Bogotá, D.C: El instituto.10p.

_____. Grasas y aceites animales y vegetales. Método de la determinación de la densidad (masa por volumen convencional). NTC 336:2016. Bogotá, D.C: El instituto.11p.

_____. Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de yodo. NTC 283:2012. Bogotá, D.C: El instituto.16p.

_____. Calidad del agua. Determinación del pH. NTC 3651:2012. Bogotá, D.C: El instituto.13p.

_____. Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del contenido de impurezas insolubles. NTC 240:2011. Bogotá, D.C: El instituto.8p.

_____. Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de acidez y de la acidez. NTC 218:2011. Bogotá, D.C: El instituto.16p.

_____. Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de peróxido. NTC 236:2011. Bogotá, D.C: El instituto.13p.

_____. Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del índice de refracción. NTC 289:2002. Bogotá, D.C: El instituto.8p.

KELLENS, Marc. Developments in fat fractionation technology. En: Oils & Fats symposium Fractional Crystallisation of Fats. p. 9. ISSN 1353-114X

KHAN ACADEMY. Lípidos. [Sitio web]. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://es.khanacademy.org/science/biology/macromolecules/lipids/a/lipids>

KNOTHE, Gerhard., DUNN, Robert. A Comprehensive Evaluation of the Melting Points of Fatty Acids and Esters Determined by Differential Scanning Calorimetry. En: Revista AOCS. 2009. p.853.

KUMAR, Brajesh, et al. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis L.*) oil for one pot synthesis of silver nanocatalyst: An ecofriendly approach. En: Industrial Crops and Products. 2014.Vol.58. p.239.

LA VANGUARDIA. ¿A qué temperatura hay que calentar el aceite para hacer una buena fritura? [Sitio web]. [Consultado 06, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/comer/recetas/20161125/412112428990/temperatura-aceite-freir-180-c.html>

LEIBOVITZ, Z., RUCKENSTEIN, C. Winterization of sunflower. En: AOCS Press.1984. Vol. 61. No. 5. p. 870-872.

LEÓN, Sergio., POSSO, Jineth. Evaluación del comportamiento de los triglicéridos POP, POS y SOS en la cristalización fraccionada y separación de una mezcla grasa para la obtención de CBE. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad de América. Bogotá: 2018. p.53. [Consultado 11, junio, 2020]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6719>

LIU, Shucheng, et al. Concentration of docosahexaenoic acid (DHA) and eicosapentaenoic acid (EPA) of tuna oil by urea complexation: optimization of process parameters. En: Journal of Food Engineering. 2006. Vol.73. Issue 3. pp. 203-209. ISSN: 0260-8774

LÓPEZ, William., VALERO, Sigrid. Estudio de la estabilidad, bajo condiciones de almacenamiento, del biodiesel obtenido a partir de aceite reciclado de cocina. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad Libre de Colombia, Bogotá D.C: 2015. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7947/Documento%20William-%20Esmeralda.pdf?sequence=1>

MANRIQUE, Guillermo. Caracterización de aceites y grasas. [En línea]. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: https://www.fio.unicen.edu.ar/usuario/gmanrique/images/Grasas_y_Aceites.pdf

MEDINA, Gilma. Aceites y grasas comestibles. [En línea]. [Consultado 3, junio, 2020]. Disponible en: http://aprendeenlinea.udea.edu.co/lms/moodle/file.php/424/Gilma_Medina/Grasas_yaceites/Documento_Grasas_y_aceites.pdf

MEDLINEPLUS. Realidades acerca de las grasas poliinsaturadas. [Sitio web]. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/patientinstructions/000747.htm>

MÉNDEZ, María. Cuantificación y caracterización del contenido de sólidos y estabilidad térmica de diferentes tipos de oleínas de palma africana (*Elaeisguineensis*) y mezclas con aceite de soya (*Glycinemax*). [En línea]. Trabajo de grado. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala: 2014. p.15. [Consultado 05, junio, 2020]. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1465_Q.pdf

MINISTERIO DE COMERCIO EXTERIOR Y TURISMO. Manual de producción de sachá inchi para el biocomercio y la agroforestería sostenible. [En línea]. 2009. Primera edición. p.10. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: https://issuu.com/agronegocioscr/docs/manual_de_produccion_de_sacha_inchi_para_web

MINISTERIO DE SALUD. Resolución 2154 (08, agosto, 2012). Por la cual se establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir los aceites y grasas de origen vegetal o animal que se procesen, envasen, almacenen, transporten, exporten, importen y/o comercialicen en el país, destinados para el consumo humano y se dictan otras disposiciones. [En línea]. Bogotá D.C.: El Ministerio de Salud y Protección. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: http://normograma.invima.gov.co/docs/resolucion_minsaludps_2154_2012.htm?q=2154

MINISTERIO DE TRABAJO. Decreto 2360 (26 diciembre de 2019). Por el cual se fija el salario mínimo mensual legal. [En línea]. Santa Fe de Bogotá, D.C: El Ministerio, 2019. 4 p. [Consultado 25, junio, 2020]. Disponible en: <https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO%202360%20%20DEL%2026%20DICIEMBRE%20DE%202019.pdf>

MINISTERIO DE TRABAJO. Decreto 2663 (05 agosto de 1950). Por el cual decreta el código sustantivo del trabajo. [En línea]. Santa Fe de Bogotá, D.C: El Ministerio, 1950. [Consultado 25, junio, 2020]. Disponible en: http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/codigo_sustantivo_trabajo.html

MONSALVE, Laura. Plan de negocio para la empresa omega snack dedicada a la producción y comercialización de snack de sachá inchi en el Valle de Aburra. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad EIA. Envigado: 2016.p.19. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/2200/1/MonsalveLaura_2016_PlanNegocioEmpresa.pdf

MORENO, Sonia. Ingeniería de la síntesis de triglicéridos de ácidos omega-3 y de antioxidantes protectores catalizados por lipasas. [En línea]. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid: 2015. 125p. [Consultado 05, junio, 2020]. Disponible en: https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/669697/moreno_perez_sonia.pdf?sequence=1&isAllowed=y

OCHOA, Andrea. En Colombia gran parte de los infartos son producidos por tener el colesterol alto. En: Periódico El Pulso, Medellín. [En línea]. Marzo, 2018. sec. Generales. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <http://www.periodicoelpulso.com>

ORREGO, Jorge. Fraccionamiento por destilación molecular y caracterización de fondos de vacío de crudos colombianos. [En línea]. Trabajo de grado de investigación para optar por el título de Doctor en Química. Universidad Industrial de Santander, Santander: 2014. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2014/151313.pdf>

PARZANESE, Magali. Cristalización fraccionada: alternativa a las grasas trans. En: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Alimentos Argentinos. [Consultado 08, junio, 2020]. Disponible en: <http://www.alimentosargentinos.gob.ar/>

PERRETI, G, et al. Supercritical carbon dioxide fractionation of fish oil fatty acid ethyl esters. En: Journal of Supercritical Fluids. 2007. Vol.40. No.3 p.350.

PRADOS, Isabel. Concentración de ácidos grasos poliinsaturados y análisis de uretanos en la formación de complejos con urea. [En línea]. Trabajo de Fin de Máster: Máster en Química Agrícola y Nuevos Alimentos. Instituto de Investigación en Ciencias de la Alimentación, España: 2015. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/152136>

REVISTA DINERO. La planta que le quita terreno a la coca en Colombia. 2019. [Sitio web] [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <http://www.dinero.com/edicion-impresa/negocios/articulo/la-planta-que-puede-competir-en-rentabilidad-con-la-coca/267323>

REVISTA PERFIL. Conozca la sacha inchi: la semilla milagrosa utilizada por los incas. [Sitio web]. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.revistaperfil.com/bienestar/nutricion/conozca-la-sacha-inchi-la-semilla-milagrosa/TB5JQGUB2VA7TCRIFRQZ63HCFA/story/>

RINCÓN, Sandra., MARTÍNEZ, Daniel. Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. En: Revista PALMAS. 2009. Vol. 30. No. 2. p.17.

RIVERA, Carmen., RIVERA, Patricia., RIZO, Jahoska. Desarrollo de un método analítico alternativo para la determinación del porcentaje de humedad y materia volátil en aceite vegetal de uso comestible. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León: 2015. p.32. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/4224/1/229228.pdf>

RODRÍGUEZ, J., et al. Índice de saponificación de cinco mantecas determinado mediante un micrométodo. En: Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos. 2016. Vol. 1. No. 1. p. 938.

RODRIGUEZ, Mailén. Uso del análisis por inyección en flujo multijeringa en determinaciones analíticas acoplado a técnicas cromatográficas. [En línea]. Tesis Doctoral. Universitat de les Illes Balears, España: 2014. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/288204/tmfr1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ROSSI, Pablo, et al. Fractionation and concentration of omega-3 by molecular distillation. En: Eicosapentaenoic Acid. Editores: Theodore Bradley, Francisco Vargas. p. 177. ISBN: 978-1-62257-480-3

RUBIO, Nuria. Supercritical fluid technology for extraction, concentration & formulation of omega-3 fish oils. A novel strategy for valorization of fish by-products. [En línea]. Tesis doctoral. Universidad de Burgos. Burgos, España: 2011. p.5. [Consultado 05, junio, 2020]. Disponible en: <https://riubu.ubu.es/>

SALABERT, Eva. Triglicéridos, por qué suben y alimentos para bajar sus niveles. [En línea]. [Consultado 08, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.webconsultas.com/curiosidades/trigliceridos-por-que-suben-y-alimentos-para-bajar-sus-niveles#:~:text=Los%20triglic%C3%A9ridos%20son%20un%20tipo,tambi%C3%A9n%20puede%20producir%20el%20h%C3%ADgado.>

SANTOS, Sandra. Estudio de la estabilidad del aceite de Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) a diferentes condiciones de inhibición oxidativa. Trabajo de grado. Universidad Técnica de Ambato. Ecuador: 2018. [Consultado 06, junio, 2020]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/28374/1/AL%20679.pdf>

SERVICIO NACIONAL DEL CONSUMIDOR. Análisis de Productos Alimenticios Enriquecidos con Ácidos Grasos Omega-3. [Sitio web]. Chile: 2004. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: <https://www.sernac.cl/portal/619/w3-article-6077.html>

SOCIEDAD ARGENTINA DE NUTRICIÓN. Grasas y aceites. [En línea]. p.2. [Consultado 10, abril 2020]. Disponible en: <http://www.sanutricion.org.ar/files/upload/files/Grasas-y-Aceites.pdf>

STAIR, R. Guía de aceites comestibles, composición, aplicación, nutrición y más. Memphis: Asociación Nacional de Productos de Semillas de Algodón de los E.U.A. Citado por: HURTADO, Zully. Op. Cit., p.48.

TECNOLOGÍAS PARA LA INDUSTRIA ALIMENTARIA. Cristalización. En: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Alimentos Argentinos.p.6. [Consultado 11, junio, 2020]. Disponible en: http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_10_Fraccionamiento.pdf

TENGGU, Rozaina, T.M., BIRCH, Edward. Effects of fractionation on melting and crystallisation profiles of hoki oil measured by DSC. En: Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2015. Vol.120. No.1. p.397.

TIMMS, Ralph. Fat Crystallization: mechanism and methods for studying. Cairo, 2007.p.11.

TIMMS, Ralph. Fractional crystallisation – the fat modification process for the 21st century. En: European Journal of Lipid Science and Technology. 2005. Vol.107. No.1. p.51.

ULLAH, Rahman, et al. Fractionation of Chia Oil for Enrichment of Omega-3 and 6 Fatty Acids and Oxidative Stability of Fractions. En: Food and Science Biotechnology. 2016. Vol. 25. No. 1. p. 44.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA. Lípidos. [Sitio web]. [Consultado 05, junio, 2020]. Disponible en: <http://sgpwe.izt.uam.mx/pages/cbs/epa/archivos/quimalim/lipidos.pdf>

UNIVERSIDAD DE BARCELONA. Tipos de destilación. [Sitio web]. [Consultado 10, abril, 2020]. Disponible en: http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/destilacio_tipus.html#vapor

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MISIONES. Cristalización. [En línea]. p.6. [Consultado 05, junio, 2020]. Disponible en: <http://www.aulavirtual-exactas.dyndns.org/claroline/backends/download.php?url=L0NyaXN0YWxpemFjafNuL0NyaXN0YWxpemFjafNuLnBkZg%3D%3D&cidReset=true&cidReq=OPTRCA>

VAZQUEZ DE FRUTOS, Luis. Extracción con fluidos supercríticos y síntesis enzimática para la obtención de lípidos funcionales. [En línea]. Tesis Doctoral. Universidad autónoma de Madrid, España: 2008. [Consultado 01, junio, 2020]. Disponible en: <https://repositorio.uam.es/>

VELASCO, Reinaldo., VILLADA, Héctor., CARRERA, Jorge. Aplicaciones de los fluidos supercríticos en la agroindustria. Universidad del Cauca. Popayán: 2007. Vol. 18, No.1. p 53-65.

WAITZBERG, Dan., GARLA, Priscila. Contribución de los Ácidos Grasos Omega-3 para la Memoria y la Función Cognitiva. En: Nutrición Hospitalaria. 2014, Vol.30. No.3. p. 468. ISSN 0212-1611

WANG, Susan., ZHU, Fan., KAKUDA, Yukio. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis L.*): Nutritional composition, biological activity, and uses. En: Food Chemistry. 2018. Vol.265. p.325.

ZULETA, Ernesto., RIOS, Luis., BENJUMEA, Pedro. Oxidative stability and cold flow behavior of palm, sacha-inchi, jatropha and castor oil biodiesel blends. En: Fuel Processing Technology.2012. Vol.102. p.98

ANEXOS

ANEXO A COTIZACIÓN FILTRO PRENSA

| | | | | | | |
|---|---|--|----|----------------|---|-----------|
|  | Empresa de Recuperación y Conservación Ambiental ERCA S.A.S Soluciones y Sistemas para la Ingeniería del Aguas | | | | | |
| | PROCESO | | | COTIZACIÓN | | |
| | FECHA EMISION | | | JUNIO DEL 2020 | | |
| | CÓDIGO | | | ERCA – COD 001 | | |
| | VERSIÓN | | 01 | HOJA | 2 | DE |

FILTRO PRENSA

- **Bastidor**

El cabezal fijo de entrada de lodos Está provisto de la tubuladura de alimentación, bien puede ser central, superior, inferior o lateral. Si el filtro es cerrado llevará incorporadas las tubuladuras para la salida de filtrado, lavado y soplado si lo requiere.

- **Protección anticorrosiva**

Imprimación con epoxi bi-componente, y acabado con poliuretano bi-componente color azul Ral 5010. Largueros forrados en acero inoxidable.

1. Filtro prensa

TABLA 1-1 Filtro prensa

| CARACTERISTICAS TÉCNICAS | IMAGEN |
|---|--|
| Construcción: Soldada Tipo de placa: Plásticos de ingeniería alta presión Número de placas: 4 placas Tamaño de placas: 500 mm Presión: 6 bar Potencia del sistema hidráulico: 2.2 KW Cabina de control: vertical grado de protección IP56 |  |

2. PROPUESTA ECONOMICA

TABLA 2-2 Presupuesto

| ITEM | DESCRIPCIÓN | UNID. | CANT. | SUBTOTAL* |
|----------|---------------|--------|-------|--------------|
| 1 | Filtro prensa | Unidad | 1 | \$ 7.236.480 |
| SUBTOTAL | | | | \$ 7.236.480 |

*No incluye IVA

ANEXO B
FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO, VALOR PRESENTE NETO (VPN) Y TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Ingresos | | \$ 37.278.000 | \$ 37.650.780 | \$ 38.027.288 | \$ 38.407.561 | \$ 38.791.636 | \$ 39.179.553 | \$ 39.571.348 | \$ 39.967.062 | \$ 40.366.732 | \$ 40.770.400 | \$ 41.178.104 | \$ 41.589.885 |
| Costos | | \$ 28.966.641 | \$ 28.966.641 | \$ 28.966.641 | \$ 28.966.641 | \$ 28.966.641 | \$ 28.966.641 | \$ 28.966.641 | \$ 28.966.641 | \$ 28.966.641 | \$ 28.966.641 | \$ 28.966.641 | \$ 28.966.641 |
| Depreciación | | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 |
| Utilidad antes impuesto | | \$ 7.205.185 | \$ 7.577.965 | \$ 7.954.473 | \$ 8.334.745 | \$ 8.718.821 | \$ 9.106.737 | \$ 9.498.533 | \$ 9.894.246 | \$ 10.293.917 | \$ 10.697.584 | \$ 11.105.288 | \$ 11.517.069 |
| Impuesto | | \$ 2.521.815 | \$ 2.652.288 | \$ 2.784.065 | \$ 2.917.161 | \$ 3.051.587 | \$ 3.187.358 | \$ 3.324.487 | \$ 3.462.986 | \$ 3.602.871 | \$ 3.744.155 | \$ 3.886.851 | \$ 4.030.974 |
| Utilidad impuesto | | \$ 4.683.370 | \$ 4.925.677 | \$ 5.170.407 | \$ 5.417.585 | \$ 5.667.234 | \$ 5.919.379 | \$ 6.174.046 | \$ 6.431.260 | \$ 6.691.046 | \$ 6.953.430 | \$ 7.218.437 | \$ 7.486.095 |
| Depreciación | | | | | | | | | | | | | |
| Inversiones | \$ 26.548.182 | | | | | | | | | | | | |
| Flujo neto caja | -\$ 26.548.182 | \$ 4.683.370 | \$ 4.925.677 | \$ 5.170.407 | \$ 5.417.585 | \$ 5.667.234 | \$ 5.919.379 | \$ 6.174.046 | \$ 6.431.260 | \$ 6.691.046 | \$ 6.953.430 | \$ 7.218.437 | \$ 7.486.095 |

| | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Ingresos | \$ 42.005.783 | \$ 42.425.841 | \$ 42.850.100 | \$ 43.278.601 | \$ 43.711.387 | \$ 44.148.501 | \$ 44.589.986 | \$ 45.035.885 | \$ 45.486.244 | \$ 45.941.107 | \$ 46.400.518 | \$ 46.864.523 |
| Costos | \$ 31.863.305 | \$ 31.863.305 | \$ 31.863.305 | \$ 31.863.305 | \$ 31.863.305 | \$ 31.863.305 | \$ 31.863.305 | \$ 31.863.305 | \$ 31.863.305 | \$ 31.863.305 | \$ 31.863.305 | \$ 31.863.305 |
| Depreciación | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 | \$ 1.106.174 |
| Utilidad antes impuesto | \$ 9.036.304 | \$ 9.456.362 | \$ 9.880.620 | \$ 10.309.121 | \$ 10.741.907 | \$ 11.179.021 | \$ 11.620.506 | \$ 12.066.406 | \$ 12.516.765 | \$ 12.971.627 | \$ 13.431.038 | \$ 13.895.044 |
| Impuesto | \$ 3.162.706 | \$ 3.309.727 | \$ 3.458.217 | \$ 3.608.192 | \$ 3.759.668 | \$ 3.912.657 | \$ 4.067.177 | \$ 4.223.242 | \$ 4.380.868 | \$ 4.540.070 | \$ 4.700.863 | \$ 4.863.265 |
| Utilidad impuesto | \$ 5.873.598 | \$ 6.146.635 | \$ 6.422.403 | \$ 6.700.929 | \$ 6.982.240 | \$ 7.266.364 | \$ 7.553.329 | \$ 7.843.164 | \$ 8.135.897 | \$ 8.431.558 | \$ 8.730.175 | \$ 9.031.778 |
| Depreciación | | | | | | | | | | | | |
| Inversiones | | | | | | | | | | | | |
| Flujo neto caja | \$ 5.873.598 | \$ 6.146.635 | \$ 6.422.403 | \$ 6.700.929 | \$ 6.982.240 | \$ 7.266.364 | \$ 7.553.329 | \$ 7.843.164 | \$ 8.135.897 | \$ 8.431.558 | \$ 8.730.175 | \$ 9.031.778 |

| | |
|--------------|---------------|
| Tasa anual | 0,45 |
| Tasa mensual | 0,0314 |
| VPN | \$ 82.170.053 |
| TIR | 21% |