

DISEÑO DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE HIGUERRILLA EN LA PALMA (CUNDINAMARCA)

Kelly Johana Castañeda López^a y Tatiana Lizeth Contreras Montejo^a

Jose David Medina Arroyave^b

^a *Estudiante de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín Colombia*

^b *Profesor, Asesor del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia*

Resumen

El aceite de higuerrilla tiene una alta demanda en el mercado actualmente, debido a que posee muy buenas características químicas que hacen que pueda ser utilizado en la elaboración de diferentes productos en las industrias farmacéuticas, de pintura, entre otras; también es considerado como una alternativa para las energías renovables como en la producción del biodiesel, sin embargo, esta demanda no puede ser satisfecha debido a que hay una baja oferta en el mercado colombiano. Aprovechando que hay una necesidad se plantea el diseño del proceso de extracción de aceite de higuerrilla con la semilla RC 09 desarrollada por Colbio, en La Palma (Cundinamarca). Para esta zona se evaluaron las semillas los cuales tuvieron un rendimiento con media de 46.5% de aceite por medio de la extracción con solventes (hexano): mostrando que esta semilla puede tener un gran potencial, además, se encontró que el aceite antes y después del desgomado (proceso de purificación) cumple con las normas de la AOCS (American Oil Chemists' Society) y el British Standard FirstQuality, lo cual garantiza que el aceite pueda ser usado como materia prima para cualquiera de los procesos que lo requieran.

El método de extracción por prensado se diseñó como el más viable y adaptable a la región de interés en cuanto a tecnología y eficiencia, se obtuvo una TIR de 13% y un retorno de la inversión en 6 años, sin embargo, si se venden los subproductos obtenidos en el proceso se puede retornar la inversión en menos tiempo y de esta forma se obtendría más viabilidad en el proyecto a nivel económico, además se tiene en cuenta que habrá un alto impacto social positivo en el lugar de interés.

1. Introducción

Para el 2016 la demanda de aceite de higuerrilla en Colombia fue de 2 millones de toneladas, la cual no se logró satisfacer por el mercado nacional, debido a que no hay suficientes cultivos y productores [1], la necesidad de manufacturar más aceite de higuerrilla se hace cada vez más evidente en Colombia, por lo cual se ve una gran oportunidad para el desarrollo del área rural. La comercialización en Colombia no ha sido suficiente, para el 2010 se importaron 528.8 toneladas de aceite de ricino y para el mismo año en Bogotá la empresa BEL STAR S.A. y en Medellín la empresa ACEITE JLTF S.A. exportaron 3,1 ton de aceite a Perú y 1,5 toneladas a España [2].

Para junio de 2017 el precio promedio de la semilla de higuerrilla y del aceite de ricino fueron US \$676/MT US \$1455/MT respectivamente [3]. En este momento en Incorp S.A.S en Colombia se está vendiendo el aceite de ricino a \$8500/ Litro, teniendo en cuenta que el precio está dado por el mercado.

El cultivo de higuerrilla es considerado según el DANE como cultivo agroindustrial que tiene como fin promover a nivel nacional la producción e industrialización de cultivos mediante la participación de diferentes entidades [4]. Según datos reportados por la encuesta nacional agropecuaria del 2016 el área sembrada de Cundinamarca por cultivos agroindustriales es menor o igual a 1000 hectáreas (ha) [5] y, según las

estadísticas agropecuarias dadas por el DANE en agosto del 2017 se tiene 1.658.598 hectáreas de área sembrada/ área plantada de cultivos agroindustriales sumados en los 26 departamentos de Colombia que no incluyen a Chocó, Amazonas, Guainía, Guaviare Vaupés y San Andrés [6]. Según datos del ministerio de agricultura y desarrollo rural entre los años 2012-2016 en los departamentos de Colombia: Caldas, Bolívar, Atlántico, Santander y Valle del Cauca se encuentran 1030.5 ha de áreas sembradas de higuierilla y 972 ha de áreas cosechadas [7] , teniendo un 94% de cosechas sobre las áreas sembradas, lo que muestra una gran oportunidad en la obtención de esta semilla.

Viendo la oportunidad en el mercado del aceite de higuierilla se analizan las diferentes formas de extracción que se da por medio de diferentes técnicas como es la extracción por prensa tipo “Expeler” o también llamada tornillo sin fin. En PARSOA S.A.S realizan este tipo de extracción donde por medio de la presión de la maquina obtienen una torta con más o menos 10% de aceite el cual extraen luego por medio de solventes, lo llevan a la planta de refinación, donde el proceso utilizado es el desgomado, este negocio es rentable porque la TIR está por encima del valor del capital [8].

La extracción de este aceite ha generado estudios cinéticos y termodinámicos usando tecnologías de agua subcrítica, donde primero se extrae el aceite con ayuda del mecanismo de difusión y seguido a esto se extrae con ayuda de temperaturas y presiones altas que están sujetas a la descomposición del mecanismo de la reacción que ocurre en este proceso, esta técnica es prometedora y representa una ventaja frente a la extracción convencional por solventes orgánicos que generan residuos tóxicos [9], sin embargo debido a las condiciones hay una desventaja por el sector de interés, debido a la complejidad de las tecnologías y la instalación por ello se propone otra forma más simple que favorezca a la comunidad.

También se utilizan técnicas como el uso del dióxido de carbono supercrítico como solvente extractor mediante la optimización de la superficie de respuesta, donde la temperatura y el flujo representan factores críticos para que el proceso sea óptimo [10]. Otros estudios buscan optimizar y caracterizar el proceso de extracción de aceite de higuierilla como por ejemplo utilizando el método soxhlet con solventes polares y no polares como n-hexano, etanol, etc [11]. Estos estudios muestran que hay muchas técnicas que condicionan para obtener resultados óptimos, por lo tanto, se buscará el método de extracción que beneficie más este proyecto.

En este momento en Colombia en el municipio de La Palma se encuentran 8 hectáreas ya sembradas con la semilla RC 09 desarrollada por Colbio, el cual hace parte de un programa de desarrollo de la región como estrategia para amortiguar el impacto del conflicto interno del país. Actualmente las semillas de higuierilla son vendidas a terceros, quienes se encargan de extraer el aceite y finalmente lograr obtener el mayor valor agregado, dejando a los cultivos con márgenes de ganancia pequeños. Por esta razón los cultivadores se han planteado la posibilidad de extraer ellos mismos el aceite y, de esta forma lograr un mayor beneficio para la región. Para aportar una solución a esta problemática, este proyecto pretende evaluar la viabilidad técnica y económica de una planta extractora de aceite en este municipio, aprovechando que en este momento existe una gran demanda insatisfecha, además, de que se busca que los productores de esta semilla se vean beneficiados económica y socialmente.

La diferencia de otros proyectos respecto al nuestro, es que no existe una planta extractora y comercializadora de aceite de higuierilla en la zona de la Palma Cundinamarca, además, se integra con un proyecto de economía que se anexa en la tabla 9 como soporte, donde ambos proyectos se complementan. Sin embargo, aunque en la mayoría de estudios se hacen métodos de extracción del aceite, hay que aclarar que nuestro aporte realizado será que se analizarán dos tipos de extracción buscando cual es la más eficiente y, se verificará la viabilidad económica del proyecto en la región de interés. No obstante, no solo estamos planteando tener un gran impacto social en zonas donde la violencia ha sido muy notable sino, también tener interacción cercana con los agricultores de este municipio, lo cual aportara significativamente en nuestro desarrollo profesional. Además, si ambos proyectos de cultivar la semilla y manufacturar el aceite son exitosos en este lugar se puede pensar en una repetibilidad en otras zonas con el mismo objetivo para beneficiar diferentes municipios.

2. Materiales y métodos

2.1. Muestreo

Para asegurar que la muestra de higuera tomada de La Palma (Cundinamarca) es representativa la recolecta se hizo en zig-zag y de diferentes plantas a lo largo de las hectáreas cultivadas y, al final se separó en dos lotes. Los cultivos de higuera que se encuentran en la región de interés se muestran en la Ilustración 1.



Ilustración 1. Cultivos de higuera en curvas de nivel y semilla de higuera

2.2. Reactivos utilizados

Se empleó como solvente hexano comercial, que es una mezcla de isómeros de hexano, los cuales son: n-hexano, 2-metilpentano, 3-metilpentano, 2,3-dimetilpentano y 2,2-dimetilbutano con trazas de ciclohexano, pentano, acetona, metilciclopentano, metil.etilhexano y heptano isómero, este hexano de grado comercial puede variar con una pureza entre el 20 y el 80% [12] donde en esta experimentación fue de 96% de Merck.

Para realizar la caracterización del aceite se utilizó NaOH al 0.1 N y alcohol etílico al 96% para realizar el índice de acidez; para el procedimiento de desgomado se utilizó NaCl al 10% p/p, todos los reactivos de Bell Chem.

2.3. Montajes experimentales extracción por solventes y extracción por prensa

a) Extracción por solventes

Para la realización de la extracción por solventes se trabajó con la metodología Soxhlet, inicialmente se intentó utilizar el montaje mostrado en la Ilustración 2 que contenía un filtro de media velada (1) y una condensación con agua de la tubería (2) pero el primer elemento evitaba que el equipo extrajera realmente el aceite y el segundo era un gasto importante del recurso agua, por lo tanto se propuso un montaje mostrado en la Ilustración 3 que contenía una plancha de calentamiento y agitación (1), un matraz de fondo plano (2), el equipo Soxhlet (3), dentro del equipo se tenía el cartucho de papel filtro corrugado con el material o semilla (4) para lograr extraer el aceite sin problemas de obstrucción o que se saliera el material sólido, además de un condensador (5) y una torre de enfriamiento (6) para recircular el agua del condensador y de esta manera disminuir el gasto de agua, sin embargo este montaje no resultaba del todo eficiente por lo que para mejorar resultados se cambiaron algunos elementos como se muestra en la Ilustración 4 donde se tenía una plancha de calentamiento y agitación que cubría todo el balón (1) para evitar pérdidas de calor y un chiller o enfriador del agua (2) para hacer que la condensación fuera más eficiente. Las condiciones más relevantes de este tipo de extracción son: la temperatura, la proporción de hexano en matraz y en equipo Soxhlet, la cantidad de material a ingresar al sistema y el tiempo de extracción, que en los numerales 2.4 y 2.8 a) se describirán con más detalle.



Ilustración 2. Primer montaje de extracción

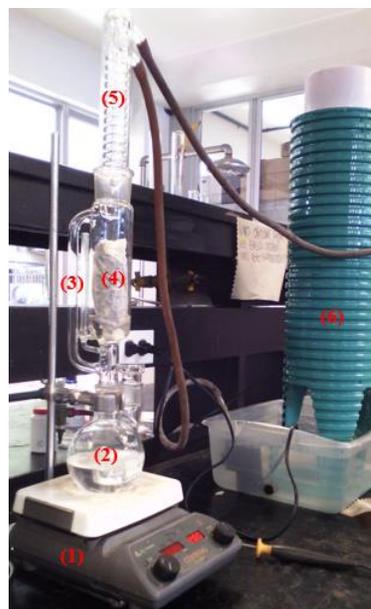


Ilustración 3. Segundo montaje de extracción

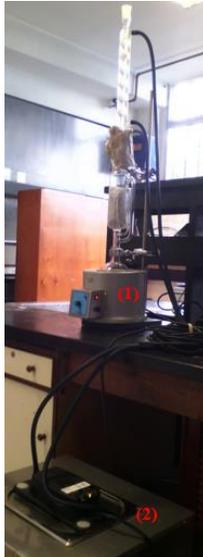


Ilustración 4. Tercer montaje de extracción

b) Extracción por prensa

Para realizar la extracción por prensa se utilizaron los montajes que se muestran en las Ilustración 5 e Ilustración 6, el montaje muestra una secuencia de las partes utilizadas para poder obtener el aceite deseado, este montaje se realizó con diferentes elementos de otros equipos, debido a que no se cuenta con una prensa que extraiga aceite, por lo que se realizó una aplicación convencional, en la Ilustración 5 se muestra que se tenía: a) un cilindro con tapa inferior ambas de acero inoxidable con perforaciones para que el aceite se filtrara, b) en el interior del cilindro se adicionaba el material en un filtro de media velada para que retuviera el material y solo saliera el aceite por la hendiduras, c) se apilaban dos placas metálicas de acero inoxidable de peso 3.01 kg y 5.57 kg para generar presión, d) se apilaba un cilindro de nylon de 1.63 kg para soportar la presión generada por la prensa y se metía el equipo dentro del cilindro de metal para que allí se retuviera el aceite y no se perdiera y e) se ingresaba el equipo dentro de la prensa hidráulica para generar presión y poder realizar la extracción. En la Ilustración 6 se tienen unas variaciones donde por ejemplo, en el literal a) se observa que el recipiente para retener el aceite se cambia en vez de utilizar el cilindro del literal d) de la ilustración anterior, porque hacía que el desmontaje de las partes fuera mucho más sencillo, además se observa que se adiciona más material que llega hasta la parte superior del cilindro por lo que allí se utilizó un refuerzo de filtro de dos media veladas y como era tan alto solo se pudo adicionar una placa de metal de 3.01 kg y en el literal b) se observa el equipo dentro de la prensa para extraer aceite. Las variables más representativas para realizar una buena extracción en la prensa son: la temperatura de las semillas, el tiempo y la presión (psi) ejercida por el equipo que más adelante se mencionaran en los numerales 2.5 y 2.8 b).



Ilustración 5. Montaje para extracción por prensado



Ilustración 6. Montaje para extracción con prensado con variación

2.4. Descripción del proceso de extracción por solventes y rendimiento.

Para la realización de la extracción por solventes inicialmente se tomaron las semillas recolectadas de La Palma (Cundinamarca) las cuales se tomaron como dos lotes para la experimentación, se trituraron con ayuda de una pica todo y posteriormente se llevaron al horno, el cual se calentó a 60 °C, el tiempo por lote se varió de la siguiente manera: lote 1-24 horas y lote 2-48 horas. El proceso de extracción se realizó mediante la metodología Soxhlet con el solvente hexano donde el consumo del reactivo en el proceso fue alto por lo tanto se hacía una recuperación de este por medio de la roto-evaporación y condensación; además se manejaron diferentes condiciones como, la proporción de hexano en el equipo, material en el equipo (g), tiempo de extracción (hr) y temperatura de extracción (°C), con estas variables se realizó un diseño medio factorial fraccionado 2^{4-1} y los resultados se pueden observar en la tabla 3 del numeral de resultados los datos según el lote y en el numeral 2.8 de esta sección de metodologías se explicará el porqué de estas variables experimentales.

Después de realizar la extracción en el equipo Soxhlet, se tomó un matraz de fondo redondo y se llevó al roto evaporador, el cual se calentaba hasta 69 °C con el fin de evaporar el hexano para que en el matraz solo se quedara el aceite, el tiempo de residencia en el equipo fue de 1 hora.

Para calcular el rendimiento del aceite en cada lote se pesó el matraz vacío y luego el matraz con el aceite después de haber roto-evaporado el hexano, y se obtuvo el valor por medio de la ecuación (1).

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{W_{\text{Matraz con aceite}} - W_{\text{Matraz vacío}}}{W_{\text{Material ingresado}}} \times 100 \quad (1)$$

2.5. Descripción del proceso de extracción por prensado y rendimiento

La extracción por prensado se realizó con el fin de hacer una comparación de los dos métodos de extracción y ver cuál es más viable para la región; inicialmente se tenían 2 lotes donde la semilla se calentaba a 60°C durante 19 horas para retirar el agua presente y dos horas antes de realizar el procedimiento de presado se calentaban las semillas a 80°C para el lote 1 y a 60°C para el lote 2 para que estuvieran con una mayor temperatura y de esta manera el aceite disminuyera de viscosidad y pudiera extraerse más eficientemente, posteriormente se colocaba el material en el filtro de media velada, cabe resaltar que se sabía la cantidad de material en gramos que se ingresaba a sistema, el equipo se acomodaba según se describe en el numeral 2.2 literal b, y con ayuda de la prensa hidráulica se obtuvo el aceite deseado; las variables que se tuvieron en cuenta para realizar el proceso se describen en la tabla 1 y se explican en el numeral 2.8.

Tabla 1. Datos para la extracción por prensado

Número de lote	Cantidad de Material (g)	Presión en prensa (psi)	Tiempo de prensado (min)	Temperatura de semillas (°C)
1	973.43	600	10	80
2	473.45	500	20	60

Nota: Los valores de la temperatura de la semilla son aproximados debido a que hay pérdidas por el traslado del material a la prensa.

Para analizar el rendimiento obtenido, se pesó el material que se ingresaba al sistema, y se pesaron dos tarros vacíos y luego se pesaron los tarros con el aceite para poder calcular mediante la ecuación (1) los rendimientos logrados.

2.6. Caracterización de aceite-método analítico

Al realizar el proceso de extracción por los dos métodos y obtener el aceite se realizó la respectiva caracterización para obtener el pH, la gravedad específica, el índice de refracción y el índice de acidez de cada lote analizado. El pH se midió a temperatura ambiente 23 °C; la gravedad específica se realizó a 15.5 y a 25°C tanto del aceite como del agua, tomando picnómetros y midiendo el peso del picnómetro vacío, después con el aceite o el agua para realizar una resta y saber el valor del peso real, para encontrar la gravedad específica se dividió el peso obtenido del aceite sobre el peso del agua a las mismas condiciones (Método ASTM D5554) ; el índice de refracción se midió con el refractómetro a condiciones de 25 y 40°C para todos los lotes y para el índice de acidez se realizó una solución de aceite-etanol para extracción por solventes y por prensado así: Lote 1 38 ml-25 ml y Lote 2 20 ml-15 ml, Lote 1 20 ml-15 ml y Lote 2 15 ml-10 ml respectivamente y , esta solución se puso en agitación (500 rpm) y bajo titulación con NaOH a 0.1 N con presencia de 3 gotas de fenolftaleína, en este procedimiento se obtuvieron datos de volumen inicial y final de NaOH para posteriormente con la ecuación (2) poder calcular el porcentaje de ácidos grasos y por medio de la ecuación (3) calcular el índice de acidez del aceite de cada lote (Método ASTM D5555) [13].

$$\%ac\ grasos\ libres = \frac{V_{NaOH}(ml) \times N \times 28.2}{W_{muestra}(g)} \times 100 \quad (2) \quad [13]$$

$$Ind\ de\ acidez = \%ac\ grasos\ libres \times 1.99 \quad (3) \quad [13]$$

2.7. Desgomado y caracterización de aceite.

El procedimiento del desgomado del aceite consistió en dos etapas, en la primera el aceite que se obtuvo en la extracción por las dos técnicas (Por solventes y por prensado), se calentó en un horno a 70°C y se lavó con una solución de NaCl al 10 % p/p preparada en el laboratorio a 70°C, en una proporción del 5 % con base al volumen del aceite que se extrajo en cada lote, esto se hizo para eliminar los fosfolípidos no hidratables además de otras sustancias en suspensión, posteriormente se filtró al vacío con un embudo büchner y un filtro para separar los residuos formados; en la segunda etapa el aceite extraído se calentó en un horno, el aceite a 60°C, y se lavó con un 5 % de agua destilada del laboratorio a 60°C con base al volumen del aceite, donde se terminaron de eliminar sustancias que no se deseaban como fosfolípidos o rastros de sal, después se realizó una centrifugación a 4000 rpm durante 30 minutos en una centrifuga, donde se separaron las partículas de menor tamaño, finalmente se separó el agua por decantación [13], para el aceite obtenido por la extracción por solventes se dejaron los lotes en los decantadores durante 10 días por lo que no se realizó el secado durante 3 horas a 80°C, mientras que para el aceite extraído por prensa se dejaron los lotes por 6 días en los decantadores y posteriormente se secaron durante 3 horas a 80°C.

La caracterización del aceite de cada lote después de ser desgomado se realizó con la misma metodología usada para el aceite que sale de la extracción por solventes descrita en el numeral 2.6. En la tabla 2 se muestran las marcas de los equipos usados en todos los procedimientos.

Tabla 2. Marca de los equipos usados en el proyecto.

Equipo	Marca
Horno	Heraeus T 12 de Thermo Scientific
Roto evaporador	Heidolph Hei-VAP Advantage HL/HB/G3
Refractómetro	Thermo Fisher Scientific modelo 334610 de 120 V, 60 Hz y 08 Amp de Importechnical
pH-metro	827 pH-metro con 230 V de Methohm
Filtros	Grado 1 de círculos con diámetro de 125 mm de Whatman
Picnómetro	25 ml de BOECO
Centrifuga	Marca Hettich modelo universal tipo electrónica
Prensa hidráulica	marca ERIE modelo Press systems potencia 10 kWa y fuerza 135 Ton

2.8. Variables experimentales

a) Extracción por solventes

-Proporción y volumen del solvente: Para determinar el volumen de hexano, se realizó primero una búsqueda de la mejor relación de hexano en el tubo extractor y el balón, encontrando que una relación de 2:1 (200 ml en el tubo extractor y 100 ml en el balón) es apropiada para retirar la mayor cantidad de aceite de ricino [15], como parte de la experimentación planteamos una relación de 3:2 para ver cómo cambiaba la cantidad de aceite extraído entre las dos relaciones.

-Material en el equipo: La cantidad de material que se usó fue determinada por la capacidad del tubo extractor. Se usó un tubo extractor de 500 ml, en algunos casos se varió la cantidad de material para ver cómo se comportaba la relación de hexano y cantidad de material.

-Tiempo de extracción: Se dejó un tiempo de 8 horas para que el solvente y la superficie de la semilla entraran en contacto y de esta manera extraer todo el aceite de la semilla sin dañar las propiedades del este [15], sin embargo también se realizaron experimentos con un tiempo de 6 horas para analizar cómo cambiaba la eficiencia de la extracción.

b) Extracción por prensa

Para realizar la extracción por prensado se tuvieron en cuenta unas variables muy específicas las cuales se eligieron así:

-Cantidad de material: Este fue tomado de acuerdo a la capacidad del equipo, la cantidad tomada en el lote 1 es más o menos la capacidad que soporta el equipo de alrededor 1kg de la semilla de higuera debido a su volumen, y se tomó en el lote 2 la mitad de la capacidad para poder apilar más placas para generar más presión y buscar mejores resultados en el rendimiento de la extracción del aceite.

-Presión en prensa: Se tomaron unas presiones por debajo del valor utilizado en Paris & Herrera, 2015 [16], debido a que se realizó un ensayo previo y las presiones tan altas no son soportadas por el filtro manejado, por lo tanto, se decidió bajar a la mitad del valor reportado, tomando valores de 500 y 600 psi.

-Tiempo de prensado: El tiempo de prensado se tomaba viendo el proceso, cuando comenzara a salir material por agujeros del cilindro se paraba el proceso, sin embargo, se tomó de base de acuerdo a la información reportada en Paris & Herrera, 2015 [17].

-Temperatura de semillas: La temperatura se tomó de acuerdo a la información reportada en Paris & Herrera, 2015 [17].

2.9. Diseño conceptual y análisis financiero

Para realizar el diseño conceptual del proceso de extracción de aceite por prensado se tuvieron en cuenta los elementos que se describen a continuación:

a) Descripción del proceso

En el proceso de extracción de aceite de higuera por prensado, se alimenta 70.5 ton/sem (toneladas/semestre) de semilla RC09 por una criba para eliminar tierra u otros elementos que puedan traer las semillas, luego pasa a un horno donde se calientan las semillas a 80 °C durante tres horas de esta forma se disminuye la viscosidad lo que beneficia al prensado de la semilla, al pasar por este equipo se tienen dos salidas una será de aceite y otra con la torta. El aceite extraído se lleva a un mezclador donde se vierte NaCl a 10%p/p al 5% en base al volumen del aceite a 70 °C asegurando una buena homogenización para la eliminación de los fosfolípidos no hidratables después de pasar por un filtro, seguidamente se calienta a 60 °C y se mezcla con agua destilada al 5 % base al volumen del aceite para eliminar los fosfolípidos hidratables en la decantación que toma un tiempo de 2 horas para asegurar que se divida en dos fases y permita una buena separación, posteriormente se lleva el aceite a un secador con el fin de que se evapore cualquier residuo de agua que quede en el aceite.

b) Servicios industriales

Los servicios industriales son: Gas, energía eléctrica y agua, que se especifican en el diagrama de flujo del proceso o PFD (Process Flow Diagram).

c) Regulaciones de disposición de residuos

Bajo la vigencia del decreto 1594 84 de usos del agua y residuos líquidos en el artículo 20, no se considera el NaCl y H₂O destilada como sustancia de interés sanitario, ya que no son sustancias tóxicas o cancerígenas [17].

d) Diagrama de entradas y salidas

Ir a la tabla 9 de anexos.

e) Diagrama de bloques

El diagrama de bloques se realizó bajo el estándar internacional de la ISO 10628 (Ir a la tabla 9 de anexos).

f) PFD o Diagrama de flujo del proceso

El PFD se realizó bajo el estándar internacional de la ISO 10628 (Ir a la tabla 9 de anexos).

g) Diseño y especificación de equipos

El diseño y la especificación de los equipos se ven en la tabla 9 de anexos.

h) Análisis financiero

Para ver el costo de los equipos y el flujo de caja, ir a la tabla 9 de anexos.

3. Resultados y análisis

3.1. Rendimiento y caracterización de aceite antes y después del desgomado para la extracción por solventes

El diseño factorial fraccionado de 2^{4+1} se muestra en la tabla 3, donde se encuentran las condiciones con las variables experimentales trabajadas para la extracción de aceite de higuierilla por solventes.

Tabla 3. Datos para la extracción usando el método Soxhlet.

Consecutivo experimento	Número de lote	Proporción de hexano*	Material en el equipo (g)	Tiempo de extracción (hr)	Temperatura de extracción (°C)
1	2	2:1	200	8	69
2	2	2:1	300	6	69
3	1	3:2	200	8	69
4	1	2:1	300	8	69
5	2	3:2	200	6	69
6	1	2:1	200	6	69
7	2	3:2	300	8	69
8	1	3:2	300	6	69

*Nota: Las proporciones de hexano en el equipo se manejaron de la siguiente forma, por ejemplo, 3:2 fue 300 ml en el tubo extractor y 200 ml en el matraz.

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos del rendimiento (%) del aceite obtenido a través de la extracción por solventes con metodología Soxhlet.

Tabla 4. Rendimiento del aceite obtenido por extracción con solventes.

Consecutivo de experimento	Rendimiento (%)
1	46.27
2	41.20
3	50.47
4	48.80
5	47.30
6	46.25
7	50.45
8	41.26

Se puede analizar de acuerdo a los resultados obtenidos en la experimentación, que el rendimiento con esta semilla es alto, debido a que se encuentra entre 40-50%, con una media de 46.5 %, lo cual significa que hay una cantidad considerable de aceite que se puede extraer de la semilla.

De acuerdo a la información hallada experimentalmente de la extracción por solventes, se realiza un diseño estadístico en Statgraphics factorial fraccionado 2^{4+1} y se realiza el gráfico de Daniels de probabilidad normal y los diagramas de caja y bigotes para analizar si las variables experimentales como el lote, la proporción de hexano, el material en el equipo y el tiempo de extracción afectan el rendimiento (Variable de respuesta). Se anexan en tabla 9 los datos arrojados por Statgraphics para tener el soporte de los análisis realizados y los resultados obtenidos.

Gráfico de probabilidad normal para el Rendimiento

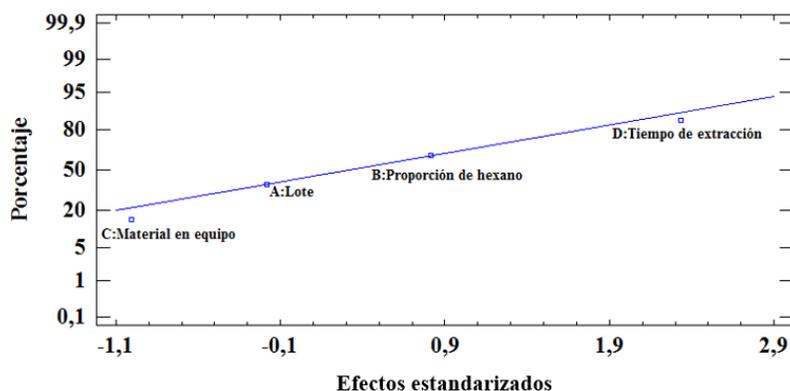
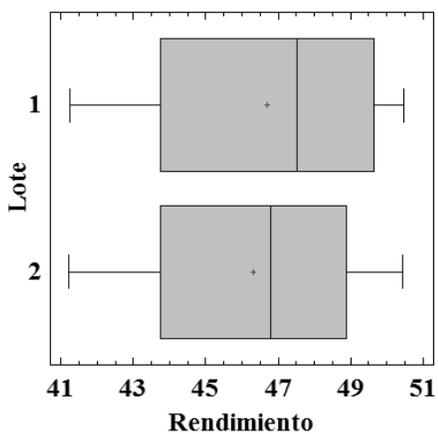


Ilustración 7. Gráfico de probabilidad normal para la variable de respuesta rendimiento de la extracción por solventes

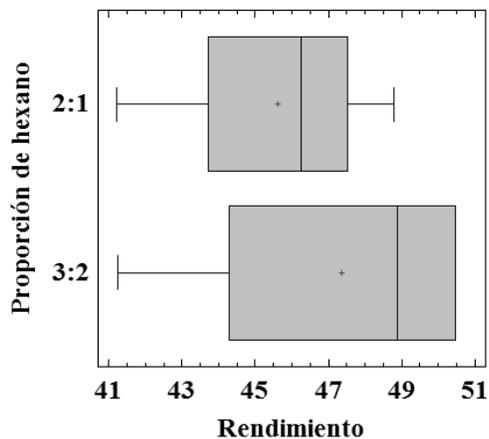
Realizando un análisis de los resultados obtenidos por medio del gráfico de Daniels que se muestra en la ilustración 7 se puede analizar que los factores (Variables experimentales) se encuentran muy cerca de la línea de distribución porque estos fueron similares, sin embargo, los factores de tiempo de extracción y de material en el equipo son los que tienen más incidencia en el rendimiento del proceso de extracción porque no están sobre la línea de distribución, mientras que tanto el lote como la proporción de hexano no tienen tanto efecto sobre la variable de respuesta a analizar debido a que se encuentran sobre la línea de distribución teniendo una probabilidad normal.

Diagrama de caja y bigotes



a)

Diagrama de caja y bigotes



b)

Ilustración 8. Diagrama de cajas y bigotes- a) Lote vs Rendimiento b) Proporción de hexano vs Rendimiento

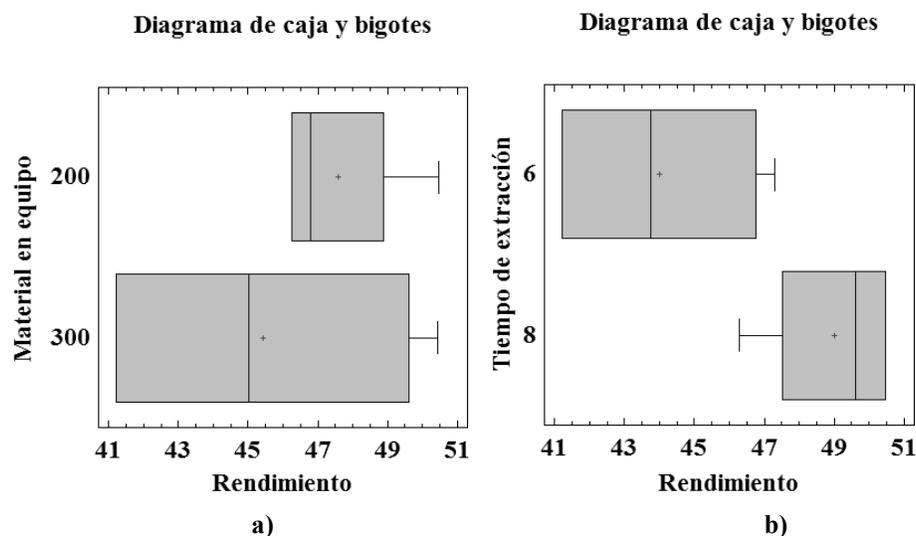


Ilustración 9. Diagrama de cajas y bigotes- a) Material en equipo vs Rendimiento b) Tiempo de extracción vs Rendimiento

Como complemento a los resultados hallados por el gráfico de Daniels (ilustración 7), se analizan los diagramas de caja y bigotes. De acuerdo a la ilustración 8 a), se puede observar que los cuartiles se distribuyen de forma homogénea, además los límites superiores e inferiores se encuentran en los mismos valores de rendimiento, por lo cual el indicativo de notificar el lote, no tiene incidencia sobre el rendimiento. Según la ilustración 8 b), se puede observar que los rendimientos son ligeramente superiores con la relación 3:2 de proporción de hexano, sin embargo, esta variable no tiene tanta incidencia sobre el rendimiento. La ilustración 9 a), muestra que la cantidad de material en el equipo tiene una buena distribución de los cuartiles y, con más material se puede lograr más rendimiento, teniendo este efecto sobre la variable de respuesta. Finalmente, y de acuerdo a la ilustración 9 b), se puede analizar que, al tener un mayor tiempo de extracción, se tendrá un mayor rendimiento, por lo tanto, esta variable experimental tiene un gran efecto en la variable de respuesta que se está analizando.

En la tabla 5, se muestran los resultados obtenidos en la caracterización del aceite antes de desgomarse, para poder analizar si el aceite extraído cumple con los estándares de calidad.

Tabla 5. Caracterización del aceite extraído por solventes antes de purificarse.

Consecutivo de experimento	Índice de acidez	% ácidos grasos	pH	Índice de refracción a 25°C	Índice de refracción a 40°C	Gravedad específica a 15.5/15.5°C	Gravedad específica a 25/25°C
1	1.23	0.62	4.53	1.4770	1.4730	0.9670	0.9600
2	1.21	0.61	4.55	1.4769	1.4729	0.9650	0.9652
3	1.33	0.67	4.50	1.4765	1.4726	0.9620	0.9420
4	1.35	0.68	4.52	1.4764	1.4727	0.9647	0.9610
5	1.77	0.89	5.23	1.4731	1.4727	0.9646	0.9652
6	1.25	0.63	5.20	1.4749	1.4728	0.9644	0.9613
7	1.24	0.62	5.18	1.4748	1.4729	0.9643	0.9453
8	1.82	0.92	5.20	1.4730	1.4726	0.9645	0.9510

Para realizar una comparación y analizar si los resultados obtenidos del aceite cumplen los estándares, se muestra la tabla 6, que establece los límites permisibles para el índice de acidez, el índice de refracción a 25 y 40°C y la gravedad específica a 15.5/15.5°C y 25/25°C según las normas de las entidades de AOCS (American Oil Chemists' Society) o el British Standard FirstQuality.

Tabla 6. Estándares para verificar resultados obtenidos [13].

Propiedad	AOCS	British Standard FirstQuality
Índice de acidez	4 máx.	4 máx.
Índice de refracción 25°C	1.473-1.477	1.477-1.481
Índice de refracción 40°C	1.466-1.473	-
Gravedad específica 15.5/15.5°C	0.958-0.968	0.958-0.969
Gravedad específica 25/25°C	0.945-0.965	

Fuente Weiss,1983

Se encuentra que los resultados del índice de acidez se tuvieron dentro de los límites según las normas, es decir que no superaron el número 4, sino que todos estuvieron entre 1-2; según Santos *et. al.* (2001), los aceites con ácidos grasos inferiores al 1 % son clasificados de tipo 1, y cuando presentan no más de 2,5 % de acidez libre, se consideran de tipo 3 [13], por lo tanto, el aceite obtenido es de tipo 1, debido a que en todos los experimentos con los lotes los ácidos grasos no superaron el 1%, con datos entre 0.61-0.92, por lo tanto, se obtuvo un aceite de buena calidad. El pH es ácido, es decir que se encuentra en la escala de acidez y basicidad entre 1-6, en este caso obtuvimos valores entre 4-5, por tanto dio buenos resultados debido a que el aceite de ricino o de higuierilla está generalmente en un pH de 4.8 cuando se realiza extracción por solventes [20], los resultados del índice de refracción a 40°C están entre 1.4726-1.4730 y a 25°C entre 1.4730-1.4770 cumpliendo los límites de 1.466-1.473 y 1.473-1.477 de las normas de la AOCS respectivamente y la gravedad específica a 15.5/15.5°C tiene resultados entre 0.9620-0.9670 y a 25/25°C entre 0.9420-0.9652 también se encuentran dentro de los límites dados por la AOCS que se muestra en la tabla 6; este análisis indica que el aceite obtenido cumple con las características con las que se regula este tipo de aceite agroindustrial.

Se observa en la tabla 7 que solo se reportan datos de dos experimentos de los dos lotes, debido a que para hacer el análisis de la calidad del aceite solo se necesitaban los datos antes de la purificación, sin embargo, se midieron estas propiedades con el fin de ver si el aceite seguía cumpliendo con los límites permisibles por las entidades de estandarización como la AOCS y el British Standard FirstQuality

Tabla 7. Caracterización del aceite extraído por solventes después de purificarse (desgomarse).

Propiedad	Lote 1	Lote 2
Índice de refracción a 40°C	1.4720	1.4715
Índice de refracción a 25°C	1.4781	1.4775
pH	5.41	5.41
Gravedad específica a 15.5°C	0.9670	0.9654
Gravedad específica a 25°C	0.9645	0.9630
% ácidos grasos	0.78	0.77
Índice de acidez	1.55	1.53

Según los resultados obtenidos de la caracterización del aceite después de su purificación se puede analizar que el índice de refracción de 40°C se encuentra entre 1.4715-1.4720 cumpliendo con el rango de 1.466-1.473 de las normas AOCS que se muestra en la tabla 6; el índice de refracción de 25°C está en un rango entre 1.4775-1.4781 cumpliendo con el British Standard FirstQuality de 1.477-1.481, se puede ver que el pH se encuentra en la escala acida que va de 1-6, siendo de 5.41 y, tanto la gravedad específica como en índice de acidez cumplen con las AOCS porque no se salen del rango admisible por los estándares de calidad, además se obtuvo un aceite de buena calidad porque los ácidos grasos no

superan el 1% por lo que es de tipo 1, mostrando que los lotes analizados cumplen con los estándares de los aceites.

En la ilustración 10, que se muestra a continuación, se puede ver la variación del color antes y después de realizar el desgomado o proceso de purificación. Y según la ilustración 11 de la gama de amarillos, se puede observar que se tenía antes del desgomado un color amarillo pajizo y después de purificarse se obtuvo un amarillo pálido.

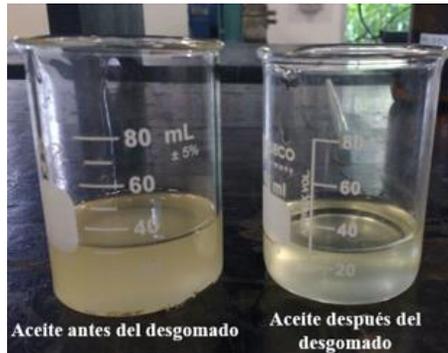


Ilustración 10. Color del aceite antes y después de desgomarlo.



Ilustración 11. Gama de amarillos [21].

Como dato adicional se agrega en tabla 9 de anexos un archivo en formato PDF que contiene los resultados hechos al aceite por infrarrojo para ver sus grupos funcionales, los resultados son iguales para aceite desgomado y sin desgomar.

3.2. Rendimiento y caracterización de aceite antes y después del desgomado para la extracción por prensado

Con la extracción por prensado se obtienen rendimientos de: Lote 1-27.34% y Lote 2-25.83%. El rendimiento no es tan alto en comparación con la extracción por solventes, debido a que este montaje se hizo para analizar el proceso porque no se contaba con prensa que estuviera adecuada para extracción de aceite, sino que se realizó un montaje convencional para poder realizar la experimentación; sin embargo, en la estudios recientes de extracción de aceite de higuera se puede encontrar que el rendimiento es del 23.8% [22] aproximadamente, mostrando que se alcanzaron buenos rendimientos, también, al llevar a cabo el proceso de forma experimental se pudieron ver muchas variables que se tuvieron en cuenta a la hora de realizar el diseño de la planta de forma conceptual; en la tabla 8 se muestran los datos obtenidos de la caracterización antes y después del prensado para poder analizar la calidad del aceite obtenido por esta técnica de extracción.

Tabla 8. Caracterización del aceite extraído por prensado antes y después de desgomarse.

Propiedad	Antes de desgomado		Después de desgomado	
	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2
Índice de refracción a 40°C	1.4718	1.4725	1.4745	1.4745
Índice de refracción a 25°C	1.4792	1.4792	1.4800	1.4791
pH	6.29	6.24	6	6
% ácidos grasos	0.78	0.69	0.88	0.82
Índice de acidez	1.56	1.36	1.75	1.64

De acuerdo, a la tabla 6, se analiza que las propiedades medidas antes del desgomado como el índice de refracción a 40 y a 25°C y el índice de acidez están dentro del rango de las AOCS que son 4 máximo para índice de acidez y 1.466-1.473 y 1.473-1.477 para índice de refracción a 40 y a 25°C respectivamente, por lo tanto el aceite es de buena calidad, además el pH se encuentran en un valor entre 6.24-6.29, este es menos ácido que el de la extracción por solventes debido a que aquí no se utiliza ningún agente químico que cambie el medio; el aceite es de calidad tipo 1 porque sus ácidos grasos son inferiores al 1%. Los resultados obtenidos de la caracterización después del desgomado muestran según la tabla 6 que el índice de refracción a 40°C se sale un poco del estándar de las AOCS que es 1.466-1.473, pero se acerca mucho y el índice de refracción a 25°C cumple con el British Standard FirstQuality que tiene un rango de 1.477-1.481, tiene pH de 6, y los ácidos grasos no superan el 1%, por lo tanto, es de tipo 1; el aceite extraído por esta técnica cumple con los estándares y con la calidad, se puede decir que el aceite obtenido por medio de esta semilla RC09 puede generar muy buenos resultados.

3.3. Diseño conceptual

Se propuso hacer un diseño de una planta extractora de aceite de higuierilla usando como método de extracción la prensa, debido a que es más eficiente en tiempo, además no se necesita de un solvente contaminante o regulado, como es el caso de la extracción por solventes. Para esta parte del trabajo nos basamos en la literatura y tuvimos en cuenta las variables analizadas en la experiencia al realizar este proceso de extracción. A continuación, se presentan lo ítems que se tuvieron en cuenta para el diseño de la planta:

3.3.1. Diagrama de entradas y salidas

El diagrama de entradas y salidas ayudó a visualizar de una manera más clara la materia prima que entra al proceso como semilla RC09, NaCl al 10% p/p, agua destilada y NaOH al 0,1 N y las salidas como residuos líquidos, residuos sólidos como la torta que sale del prensado y el aceite (producto de interés); conocer los requerimientos de un proceso a la entrada y la salida es importante porque ayuda a ver cuáles son las normas ambientales que se deben manejar y las gestiones de transporte y calidad que se deben tener en cuenta para el buen funcionamiento de un proceso, este diagrama que se menciona en la metodología se encuentra referido en la tabla 9 de anexos.

3.3.2. Diagrama de bloques

Para hacer el diagrama de bloques del proceso se realizaron los balances de masa que se especifican en la tabla 9 de anexos, donde se tuvieron en cuenta algunas especificaciones como: El rendimiento teórico que se encontró de estudios recientes es de 23.8% [22], por lo tanto se trabajó con este porcentaje para saber cuánto aceite se podía obtener de 70 ton/semestre de semilla que es la capacidad con la cual se hizo la planta de extracción, porque una hectárea produce 3.5 ton por año según datos obtenidos de la zona de interés, y se justifica hacer una planta de extracción con 40 hectáreas cultivadas

debido a que el proyecto “Energy hand-made” (anexado en tabla 9) tiene como fin aumentar las zonas de cultivo en La Palma para que pase de 8 hectáreas que hay actualmente cultivadas a más de 40 hectáreas para poder extraer aceite de forma primaria y obtener más ganancias tanto sociales como económicas para la región, y tener una producción de aceite de 140 Ton/año. Además, se consideró que en el proceso de prensado la torta sale con un 8% de aceite de higuera [23]. Con el diagrama de bloques se pueden ver las etapas del proceso y los flujos en ton/semestre que de cada parte del proceso y, de esta manera conocer los equipos necesarios para este proyecto.

3.3.3. PFD

En el PFD o diagrama de flujo de proceso se especifican los equipos utilizados en el diseño de forma conceptual, también se encuentran los flujos de cada etapa. Los equipos son elegidos según los especificados en la norma ISO 10628.

Realizar este tipo de diagrama da una visión más completa del proceso paso a paso incluyendo los servicios industriales como energía eléctrica que se menciona en los equipos con la letra M o gas natural que se menciona con la letra G, además ayuda a analizar las desventajas en el proceso para posibles mejoras. Aquí también se reportan las toneladas producidas y las horas de operación al año que son 5760 h/año debido a que no se trabajarán las 24 horas del día sino solo 16 horas. Cada equipo contaba con una nomenclatura que nombraba cada equipo, de la siguiente manera: C1-Criba, H1-Horno, P1-Prensa, TMCn-Tanque de mezclado y calentamiento, F1-Equipo de filtración, D1-Decantador y S1-Secador.

3.3.4. Diseño y especificación de equipos

Los equipos diseñados de forma conceptual para la planta del proceso de extracción de aceite fueron los mencionados anteriormente. Para ver paso a paso el diseño de los equipos ir a la tabla 9 de anexos “Diseño de equipos-explicación de cálculos” en formato PDF también se puede ir al documento en formato xlsx nombrado “Diseño de equipos”, donde se encuentran los cálculos realizados. Los equipos tienen cada uno sus particularidades y dependiendo de la capacidad que se requiera en cada etapa del proceso, el diseño y las especificaciones de estos ayudan a suplir esas necesidades requeridas, además ayudan a dimensionar los equipos para poder saber costo y de esta manera tener el análisis económico.

3.3.5. Costo de equipos y flujo de caja

Los equipos se costearon utilizando dos métodos: conociendo el presupuesto por medio de empresas de ingeniería y también con el procedimiento utilizado en Turton *et. al*, 2009 [24], se deben tener en cuenta propiedades como el área, el volumen o la potencia de los equipos para poder realizar este costeo. Se encontró que se requieren 8 trabajadores en el proceso, que el costo de mano de obra (CoL) sería de \$6'566.856 y que el COM (2017) o costo de manufactura sería con depreciación de \$214'193.656; sin embargo esto no dice mucho, por lo tanto con los datos obtenidos de los costos no solo de los equipos, sino también de la materia prima, de los residuos y de los servicios industriales se puede hacer el respectivo flujo de caja que muestra la viabilidad del proyecto; en la tabla 9 de anexos “Costo de equipos” en formato xlsx, se presenta como se realizó este costeo.

Según los resultados obtenidos en el flujo de caja se puede encontrar que la TIR es del 13%, y el retorno de la inversión sería en el año 6 del proyecto, por lo tanto, se deben buscar alternativas como la venta del subproducto/residuo (Torta de higuera) u otros métodos que generen más rentabilidad en este proyecto debido a que el impacto social y económico que puede tener en la región es importante.

4. Conclusiones

- Como parte de la investigación del presente proyecto, se concluye que la media en cantidad de aceite obtenida por el método de solventes es de 46.5 % y que las propiedades de este aceite extraído a diferentes condiciones ya nombradas en este trabajo cumplen con las normas AOCS (American Oil Chemists' Society) y el British Standard FirstQuality, por lo que es una semilla que tiene un gran potencial en el mercado.
- El método de extracción por prensado es mucho más eficiente en cuanto a tiempo y costos respecto a la extracción por solventes, además no requiere un solvente contaminante y regulado para extraer aceite, en consecuencia, con este análisis se decide realizar el diseño con la prensa, ya que en la zona de interés beneficia más realizar la extracción por este método.
- Las propiedades fisicoquímicas del aceite cumplen con los rangos establecidos por las normas de la AOCS (American Oil Chemists' Society) y el British Standard FirstQuality, antes y después del desgomado (Proceso de purificación), por lo que realizar el proceso de purificación solo le da una ventaja en cuestión de calidad del color que serían aprovechados en industrias que lo requieran con esta característica.
- La TIR del diseño del proceso de extracción de aceite de higuera es del 13%, teniendo un retorno de la inversión en el 6to (sexto) año, sin embargo, el proyecto podría ser más viable para la región de interés si se tuviera una venta del subproducto o residuo de torta obtenido que generara más ingresos.
- Un proyecto similar a este, pero de mayor magnitud puede ser más viable a nivel económico, sin embargo, hay que hacer un mayor esfuerzo en la economía agrícola para poder llegar a mejores niveles.

5. Tabla de Anexos o Apéndices

A continuación, se muestra en la tabla 9 de anexos la información adicional para soportar el proyecto de grado.

Tabla 9. Documentos adicionales incluidos con el proyecto de grado.

Nombre	Desarrollo (propio/terceros)	Tipo de Archivo	Enlace google drive (https://goo.gl/)
Energy hand-made	Natalia Machado Fabián Flores Susana Velázquez	Documento PDF	goo.gl/eamLMn
Diagrama in-out	Johana Castañeda Tatiana Contreras	Documento PDF	goo.gl/eamLMn
Diagrama de bloques	Johana Castañeda Tatiana Contreras	Documento PDF	goo.gl/eamLMn
Balances de masa	Johana Castañeda Tatiana Contreras	Documento PDF	goo.gl/eamLMn
PFD	Johana Castañeda Tatiana Contreras	Documento PDF	goo.gl/eamLMn
Datos Statgraphics	Johana Castañeda Tatiana Contreras	Documento PDF	goo.gl/eamLMn
Aceite de higuera- infrarrojo		Documento PDF	goo.gl/eamLMn
Diseño de equipos	Johana Castañeda Tatiana Contreras	Documento xlsx	goo.gl/eamLMn
Diseño de equipos- explicación de cálculos	Johana Castañeda Tatiana Contreras	Documento PDF	goo.gl/eamLMn
Costo de equipos	Johana Castañeda Tatiana Contreras	Documento xlsx	goo.gl/eamLMn
Flujo de caja	Johana Castañeda Tatiana Contreras	Documento xlsx	goo.gl/eamLMn

Referencias

- [1] CONtexto Gnadero, “Higuerilla, alternativa de rentabilidad para los productores del país | Contexto Ganadero,” 20116. [En línea]. Disponible: <http://www.contextoganadero.com/regiones/higuerilla-alternativa-de-rentabilidad-para-los-productores-del-pais>. [Accedido: 26-ene-2017].
- [2] ProExport, “Catálogo oferta exportable de Colombia,” 2010. [En línea]. Disponible: [http://catalogo.procolombia.co/es/resultados?query=aceite de ricino&cx=005516855461614639165%253Ayaszqwq8p7m0&cof=FORID%253A11](http://catalogo.procolombia.co/es/resultados?query=aceite+de+ricino&cx=005516855461614639165%253Ayaszqwq8p7m0&cof=FORID%253A11). [Accedido: 20-feb-2017].
- [3] Castoroil.in, “Castor Oil and Seed Prices | CastorOil Blog,” 2017. [En línea]. Disponible: <http://www.castoroil.in/>. [Accedido: 11-sep-2017].
- [4] Gobierno de la República de Honduras, “Cultivos Agroindustriales - Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria.” [En línea]. Disponible: <http://www.dicta.hn/cultivos-agroindustriales.html>. [Accedido: 11-sep-2017].
- [5] DANE, “Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA).” [En línea]. Disponible: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena>. [Accedido: 11-sep-2017].
- [6] DANE, “Estadísticas agropecuarias-Encuesta Nacional Agropecuaria-Resultados 2016.” 2017.
- [7] MADR, “Base Agrícola EVA 2007-2016- Evaluaciones Agropecuarias Municipales-Ministerio de agricultura y desarrollo rural.” 2016.
- [8] S. Mesa and F. Richard, “Plan de negocio para empresa productora de aceite de higuerilla en el suroeste antioqueño.” Escuela de Ingeniería de Antioquia, 2009.
- [9] W. Abdelmoez *et al.*, “Kinetic and Thermodynamics studies for Castor Oil Extraction Using Subcritical Water Technology,” *J. Oleo Sci.*, vol. 65, no. 6, pp. 477–485, 2016.
- [10] J. M. Danlami, M. A. A. Zaini, A. Arsad, and M. A. C. Yunus, “A parametric investigation of castor oil (*Ricinus communis* L) extraction using supercritical carbon dioxide via response surface optimization,” *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 53, pp. 32–39, Aug. 2015.
- [11] J. M. Danlami., A. Arsad, and M. A. A. Zaini, “Characterization and process optimization of castor oil (*Ricinus communis* L.) extracted by the soxhlet method using polar and non-polar solvents,” *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 47, pp. 99–104, Feb. 2015.
- [12] “Sustancias clasificadas. Ficha de datos de seguridad. Sustancia:Hexano.” 2005.
- [13] R. Cabrales, J. Marrugo, and J. Castro, *Rendimientos en semilla y calidad de los aceites del cultivo de higuerilla (Ricinus communis L.) en el Valle del Sinú departamento de Córdoba*. 2014.
- [14] ASTM, “Standard Practice for Extraction of Solid Waste Samples for Chemical Analysis Using Soxhlet Extraction1 Designation: D 5369 – 93 (Reapproved 2003).” 2003.
- [15] M. M. Martinez, “Producción de Biodiesel a través de la extracción de aceite de higuerilla.” Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2013.
- [16] Gina Hincapié, Andrés Moreno, and Diana López, “TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITE DE HIGUERILLA CRUDO UTILIZANDO CATALIZADORES HETEROGÉNEOS - ESTUDIO PRELIMINAR,” *Julio 22 2011*, pp. 176–181, 2011.
- [17] L. S. Paris and M. C. Herrera, “Investigación Técnico-Social de las oleaginosas promisorias Higuerilla y Sacha Inchi, con miras a su desarrollo agroindustrial.” Universidad Eafit, 2015.
- [18] ariana, “USOS DEL AGUA Y RESIDUOS LÍQUIDOS, MEDIO AMBIENTE,” *encolombia.com*, 01-Sep-1999. [En línea]. Disponible: <https://encolombia.com/medio-ambiente/normas-a/hume-decreto159484/>. [Accedido: 14-oct-2017].
- [19] ariana, “USO RACIONAL Y EFICIENTE DE LA ENERGÍA, LEY 697 DE 2001, MEDIO AMBIENTE,” *encolombia.com*, 03-Sep-1999. [En línea]. Disponible: <https://encolombia.com/medio-ambiente/normas-a/hume-ley69701/>. [Accedido: 14-oct-2017].
- [20] P. Massacci, *Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress, July 23-27, 2000, Rome, Italy*. Elsevier, 2000.
- [21] Yong & uain, “colores | Yong & uain,” 2011. [En línea]. Disponible: <https://yonguain.wordpress.com/tag/colores/>. [Accedido: 04-oct-2017].
- [22] D. Tabio García, Y. Díaz Domínguez, M. Rondón Macías, E. Fernández Santana, and R. Piloto, *Extracción de aceites de origen vegetal*. 2017.
- [23] A. Sayegh and L. Cárdenas, “Plan de empresa basado en el uso de aceite de higuerilla para la industria cosmética.” Universidad ICESI, 2011.

[24] R. Turton, R. C. Bailie, W. B. Whiting, and J. A. Shaeiwitz, *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*, Tercera edición. Pearson Education, Inc., 2009.