

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y**

**Ciencias de la Producción**

“Obtención de Parámetros de Diseño para Unidad Experimental de  
Producción de Biodiesel a partir de Aceite Refinado de Semillas de

*Jatropha Curcas*”

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ALIMENTOS**

Presentado por:

Gustavo Sixto Aveiga Ulloa

Franklin Alejandro Peñafiel Carpio

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2017

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis grandes amigos que aportaron con toda su energía y dedicación para la ejecución y finalización de éste trabajo: Juan, Emérita y Miguel. También al Dr. Sócrates Palacios por su guía.

G. Aveiga

Agradezco a Dios por permitirme esta gran experiencia profesional, mis amigos que han ayudado en la consecución de este proyecto; a los Dres.: Sócrates Palacios, Juan Peralta y Emérita Delgado.

F. Peñafiel

## DEDICATORIA

A MIS PADRES  
A MI HERMANO JOHAN  
A UN AMIGO LEJANO, PEDRO  
G. AVEIGA

A MIS PADRES  
A MI FAMILIA  
A MIS AMIGOS  
F. PEÑAFIEL

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

GUSTAVO SIXTO AVEIGA ULLOA

FRANKLIN ALEJANDRO PEÑAFIEL CARPIO

DR. SOCRATES ARTURO PALACIOS PONCE

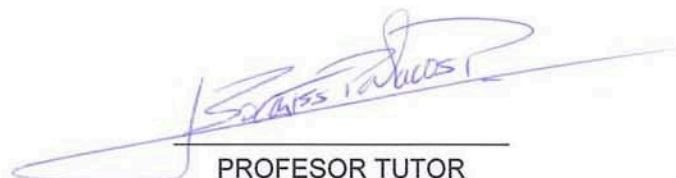
y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



Gustavo Aveiga U.



Franklin Peñafiel C.



PROFESOR TUTOR  
PROYECTO  
INTEGRADOR  
Dr. Sócrates Palacios P.

## RESUMEN

El uso de fuentes de energías amigables con el medio ambiente ha marcado una tendencia durante las últimas épocas. La disponibilidad de semillas de oleaginosas de carácter no comestible se ha presentado como una opción para las aplicaciones en el campo de la bioenergía durante la década actual.

El presente trabajo cuantifica las propiedades de las semillas de *Jatropha Curcas* nativas de la región de la costa ecuatoriana para su aplicación en un proceso de obtención de aceite refinado cuyo destino final será la producción de biodiésel.

Inicialmente, se realiza una caracterización de las propiedades morfológicas de las semillas, densidad real, densidad aparente y porosidad. Seguidamente, se determinan rendimientos de extracción con un sistema mecanizado propuesto (prensa hidráulica). Posteriormente, se caracteriza el aceite crudo extraído y el aceite refinado que se obtiene por aplicaciones de principios químicos.

Se verifica el cumplimiento de la norma DIN 51 605 de parámetros mínimos del aceite refinado como precursor de biodiesel. Por último, se realizaron las estimaciones de costos del proceso de obtención de aceite refinado con el sistema de extracción propuesto.

**Palabras Clave: *Jatropha*, semillas, aceite, caracterización.**

## SUMMARY

The use of environmentally friendly sources has marked a trend during the last decades. The availability of non-edible oilseed seeds has been presented as an option for applications in the field of bioenergy during the current decade.

The present document quantifies the properties of seeds of *Jatropha Curcas* native to the region of the Ecuadorian coast for their application in a process of obtaining refined oil whose final destination will be the production of biodiesel.

Initially, characterization of the morphological properties of the seeds, solid density, bulk density and porosity was performed. Subsequently, extraction yields are determined with a proposed machining system (extrusion with hydraulic press). Subsequently, it is characterized by extracted crude oil and refined oil that is obtained by applications of chemical principles.

The compliance with DIN 51 605 of the minimum parameters of refined oil as a reagent of biodiesel is verified. Finally, the cost estimates of the process of obtaining refined oil were carried out with the proposed extraction system.

### **Keywords:**

*Jatropha, seeds, oil, characterization*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	II
SUMMARY .....	III
ÍNDICE GENERAL .....	IV
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
INDICE DE FIGURAS .....	IX
INDICE DE TABLAS.....	X
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Descripción del problema .....	1
1.2. Hipótesis del problema .....	2
1.3. Objetivos.....	2
1.3.1. Objetivo General.....	2
1.3.2. Objetivos Específicos .....	2
1.4. Justificación del proyecto .....	2
1.5. Marco Teórico.....	3
1.5.1. Descripción botánica de Jatropha Curcas .....	3
1.5.2. Uso de Jatropha .....	5
1.5.3. Propiedades de semilla Jatropha .....	5
1.5.4. Propiedades de Físico-Química de aceite de Jatropha .....	6
1.5.5. Parámetro Físico-Químico de aceite refinado de palma.....	6
1.5.6. Tipos de extracción .....	7
1.5.7. Normativa para aceite de origen vegetal .....	8
CAPÍTULO 2.....	9
2. METODOLOGÍA .....	9
2.1. Fases de la metodología.....	9
2.2. Caracterización morfológica dimensional de semillas de Jatropha.....	9
2.3. Propiedades físicas de semilla de Jatropha.....	10
2.4. Cálculo de rendimiento de aceite crudo en la extracción mecánica.....	12

2.5.	Caracterización de aceite crudo y refinado de Jatropha .....	12
2.6.	Análisis de costos para implementación de planta piloto de extracción y refinamiento de aceite de Jatropha .....	19
CAPÍTULO 3.....		20
3.	RESULTADOS.....	20
3.1.	Caracterización de semilla, aceite crudo y aceite refinado de Jatropha ....	20
3.2.	Caracterización de semillas de Jatropha .....	20
3.3.	Propiedad física de semillas de Jatropha .....	23
3.3.1.	Densidad real y densidad aparente .....	23
3.4.	Rendimiento de extracción de aceite crudo .....	25
3.5.	Rendimiento de refinamiento de aceite crudo de Jatropha en pruebas experimentales.....	25
3.6.	Parámetros Físicos-Químicos de aceite de Jatropha .....	26
3.6.1.	Densidad .....	26
3.6.2.	Punto de inflamación .....	26
3.6.3.	Índice de refracción .....	27
3.6.4.	Índice de Yodo .....	27
3.6.5.	Índice de acidez.....	27
3.6.6.	Poder calorífico.....	27
3.7.	Análisis de costos .....	28
3.7.1.	Costos tecnológicos .....	28
3.7.2.	Costos fijos .....	30
3.7.3.	Costo de la materia prima y precio de venta de aceite refinado.....	31
3.8.	Análisis de resultados .....	32
CAPÍTULO 4.....		33
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	33
BIBLIOGRAFÍA.....		35



## **ABREVIATURAS**

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

ASTM American Society for Testing and Materials

INEN Servicio Ecuatoriano de Normalización

DIN Deutsches Institut für Normung

INIAP Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias

NTE Norma Técnica Ecuatoriana

ISO International Organization for Standardization

VAN Valor Actual Neto

TIR Tasa interna de Retorno

FIMCP Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

FACT Fuel from Agriculture in Communal Technology

## SIMBOLOGÍA

g	gramo
mg	Miligramo
%	Porcentaje
ml	Mililitro
KOH	Hidróxido de Potasio
MJ	Megajoule
°C	Grados celsius
cSt	Centistoke
I	Yodo
p/p	Peso/peso
Kg	Kilogramo
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mm <sup>2</sup>	Milímetro cuadrado
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
mm	Milímetro
s	Segundo
Da	Diámetro aritmético
Dg	Diámetro geométrico
L	Largo

An	Ancho
Es	Espesor
$\Phi$	Esfericidad
Vu	Volumen unitario
$\rho_a$	Densidad aparente
$\rho_r$	Densidad real
Mp	Masa de semilla
$\epsilon$	Porosidad
Re	Rendimiento de extracción de aceite crudo
Ms	Masa de semilla
Mt	Masa de torta
M	Molaridad
Min	Minuto
rpm	Revolución por minuto
t	Tiempo
l	Litro
Kwh	Kilovatio-hora
R <sup>2</sup>	Coeficiente de determinación

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Árbol de <i>Jatropha Curcas</i> , alrededor del Centro de Desarrollo de Tecnología sustentable-FIMCP .....	4
Figura 2 Fruto y semillas de <i>Jatropha Curcas</i> .....	4
Figura 3 Referencia para dimensiones de semillas de <i>Jatropha</i> .....	10
Figura 4 Pesado de muestra de semilla en probeta .....	11
Figura 5 Pesado de muestra de semilla con Isooctano .....	12
Figura 6 Diagrama de flujo para refinamiento de aceite crudo de <i>Jatropha</i> .....	13
Figura 7 (a) Kit de filtración para aceite crudo; (b) Determinación de densidad de aceite .....	15
Figura 8 (a) Pesado de muestra de aceite; (b) Punto de equivalencia para titulación...	16
Figura 9 sistema para obtención de punto de inflamación .....	17
Figura 10 (a) Determinación de índice de refracción de la muestra; (b) Campo oscuro e iluminado; (c) Escala numérica de refractómetro de Abbe .....	18
Figura 11 (a) Pesado de muestra de aceite en el crisol; (b) Embebido de hilo en una muestra de aceite; (c) presurizado del contenedor de descomposición con oxígeno; (d) ingreso de datos en el equipo.....	19
Figura 12 Comparación de propiedades morfológicas entre betancur et al. (2014), p. Sirisomboona, 2007 con el presente estudio.....	21
Figura 13 Relación de esfericidad con la dimensión largo en semilla de <i>Jatropha</i> .....	22
Figura 14 Relación de volumen unitario con la dimensión largo en semilla de <i>Jatropha</i> .....	23
Figura 15 Densidad y porosidad de semilla de estudio con lo reportado en la bibliografía .....	24
Figura 16 Rendimiento de cada etapa del proceso de refinamiento de aceite .....	29

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros de semilla de Jatropha .....	5
Tabla 2 Parámetros de aceite de Jatropha.....	6
Tabla 3 Propiedades de aceite crudo de Palma .....	7
Tabla 4 Parámetros para aceites Vegetal No Comestible .....	8
Tabla 5 Parámetros físicos de semilla de Jatropha .....	10
Tabla 6 Ensayos para caracterización de aceite .....	14
Tabla 7 Datos morfológicos de semillas de Jatropha (valor medio + desviación estándar) .....	20
Tabla 8 Valores físicos de semillas de Jatropha (valor medio + desviación estándar) ..	24
Tabla 9 Rendimiento de extracción de aceite de semillas de Jatropha .....	25
Tabla 10 Rendimiento global y por etapas de refinamiento de aceite .....	26
Tabla 11 Comparación de parámetros Físico-Químico de aceite de Jatropha.....	28
Tabla 12 Maquinaria requerida para extracción de 36 t de aceite de Jatropha .....	30
Tabla 13 Costos Fijos de personal por año de actividad .....	30
Tabla 14 Costos de extracción de aceite y refinamiento anual.....	31
Tabla 15 Precio de semilla y aceite refinado .....	32
Tabla 16 Análisis de costo - beneficio de refinado de aceite de Jatropha .....	32

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Descripción del problema

De acuerdo al contexto, la Constitución Política de la República de Ecuador, en su articulado, determina las consideraciones al derecho propio que tiene la población al Buen Vivir. El Estado promueve el uso de tecnologías limpias o de bajo impacto con el medio ambiente. La Constitución menciona la Soberanía Energética (Ecuador, 2008), que el país necesita para evitar la dependencia por suministro energético de otros países en el futuro. Las reservas totales probables en el Ecuador, mediante informe de la Secretaría de Hidrocarburos en el año 2011 son de alrededor de 7 193 mil millones de barriles petróleo (Petroecuador, 2016).

El diésel es uno de los derivados del petróleo utilizado generalmente por el parque automotor de carga pesada. En el proceso de obtención de diésel durante la refinación, se realiza la desulfuración eliminando parcialmente la presencia de azufre en su composición natural.

En motores de combustión interna, la ignición de diésel dentro de la cámara produce dióxido de azufre y otros gases altamente nocivos que son enviados hacia la atmósfera afectando seriamente la salud de la población como la calidad del aire. Con el aumento de concentraciones de material particulado en la atmósfera, es muy probable la formación de lluvia ácida que afecta significativamente los ecosistemas (Angulo Montesdeoca, 2008). La absorción de nutrientes por parte de la flora disminuye notablemente, por la deposición de compuestos presentes en la lluvia ácida, perjudicando la estructura morfológica tal como: tallos, hojas, raíces y frutos (Gallego Picó, y otros, 2012).

Considerando la importancia que tiene la emisión de fuentes móviles o fijas de contaminantes hacia la atmósfera, sobre la tasa de enfermedades respiratorias, principalmente. La utilización de aceite de origen vegetal no comestible para la producción de biocombustibles biodegradables, se presenta como una alternativa de

carácter tecnológico que puede adaptarse con facilidad a la capacidad propia inherente en el Ecuador.

## **1.2. Hipótesis del problema**

La obtención de aceite vegetal refinado de semillas de *Jatropha Curcas* cumplirá los parámetros mínimos como materia prima para la obtención de biocombustible.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Determinar parámetros operacionales Físico-Químicos de aceite vegetal refinado no comestible de semilla de *Jatropha Curcas* como paso previo para obtención de biodiésel.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- ✓ Caracterizar propiedades morfológicas dimensionales de la semilla de *Jatropha Curcas*.
- ✓ Estimar rendimiento de extracción de aceite vegetal crudo de semilla de *Jatropha Curcas*.
- ✓ Caracterizar las propiedades Físico-Químicas del aceite crudo y refinado de semillas de *Jatropha Curcas*.
- ✓ Comparar los parámetros Físico-Químicos del aceite refinado del estudio con el aceite de palma (*Elaeis guineensis*).
- ✓ Verificar el cumplimiento de norma de parámetros mínimos del aceite refinado para producción de biodiésel.
- ✓ Estimar costos para el procesamiento de refinado de aceite a partir de semillas de *Jatropha Curcas*.

## **1.4. Justificación del Proyecto**

El constante aumento de emisiones de fuentes contaminantes hacia la biosfera, incide sustancialmente sobre los índices de afección en el sistema respiratorio del ser humano. La utilización de aceite de origen vegetal no comestible para la producción de biocombustibles biodegradables, se presenta como una alternativa de carácter

tecnológico que puede adaptarse con facilidad a la capacidad propia inherente en el Ecuador. Este estudio pretende realizar los pasos necesarios para alcanzar las condiciones mínimas que el aceite refinado debe cumplir para ser procesado posteriormente en una unidad experimental de transesterificación para la producción de biodiésel. Las semillas de oleaginosas no comestibles, representa un recurso disponible no utilizado a nivel industrial para la obtención de biocombustible en el Ecuador, sin que éste afecte la producción de aceite para consumo humano.

## **1.5. Marco Teórico**

### **1.5.1. Descripción Botánica de *Jatropha Curcas***

La *Jatropha Curcas* es un árbol que puede crecer hasta una altura de 6 metros, pertenece a la familia de Euphobiaceae, y el tiempo de vida es aproximado de 50 años, véase Figura 1.1. El árbol tiene hojas verdes con longitud que varían de 6 a 15 centímetros, el tallo principal se ramifica desde la base. La *Jatropha* es monoica, con presencia de flores masculinas y femeninas, los racimos de frutos crecen al final de la rama entre 5 a 20 unidades, aproximadamente.

El fruto tiene una forma esférica con un diámetro máximo de 40 milímetros, por lo general, puede contener 3 semillas, o en ocasiones hasta cinco unidades por fruto (Fuel from Agriculture in Communal Technology-FACT, 2009).

Las dimensiones de las semillas de la *Jatropha* tiene un promedio de 18 milímetros de largo, 12 de ancho y 10 de espesor, éstos valores varían entre semillas de diferentes procedencias, véase Fig.1.2. Los rangos de peso de las semillas fluctúan entre 0.5 a 0.8 gramos, y con un promedio de 1,333 semillas por kilogramo (Fuel from Agriculture in Communal Technology-FACT, 2009).





**Figura 1** **Árbol de Jatropha Curcas, alrededor del Centro de Desarrollo de Tecnología Sustentable-FIMCP**

Fuente: Aveiga-Peñafiel, 2017



**Figura 2** **Fruto y semillas de Jatropha Curcas**

Fuente: Aveiga-Peñafiel, 2017

Elaboración: Propia

La semilla consiste en una cáscara dura que presenta alrededor 70% del peso total del grano, y el albumen el 30 %. En el componente de las semillas se encuentran presentes elementos tóxicos como: ésteres de forbol, curcin, inhibidores de tripsina, lectinas y fitatos. El albumen contiene aproximadamente 60 % de aceite, y 7% de humedad (Campuzano Duque, Ríos, & Cardeño López, 2016).

### 1.5.2. Uso de Jatropha

Históricamente, el árbol de Jatropha ha sido utilizado por indígenas en aplicaciones medicinales (Yate Segura, 2013). En India, las hojas del árbol se emplean para alejar plagas por la presencia de sustancias tóxicas. Durante la Segunda Guerra Mundial, el aceite de Jatropha se lo aprovechó como combustible alternativo, así como base para la producción de nitroglicerina. En las últimas décadas, el cultivo de Jatropha ha sido considerado como alternativa para la producción de biocombustibles, debido a las características de la plantación tal como: rápido crecimiento, resistencia a la sequía, fácil propagación y alto contenido de aceite (Yate Segura, 2013).

### 1.5.3. Propiedades de Semilla Jatropha

En la literatura, la semilla de Jatropha reporta un promedio de 3.89 % de cenizas, contenido de aceite alrededor de 33.40 %, humedad entre 6 a 9 %, y proteínas de 4 a 16%, véase Tabla 1.

**Tabla 1 Parámetros de semilla de Jatropha**

Propiedad	Condiciones	Valor
Cenizas (%)	-	3,89 ± 0,08
	Base seca	4,50 ± 0,05
Contenido de aceite (%)	Base seca	33,40
	Éter - 8hrs	34,2 ± 0,3
Contenido de lípidos (g /100 g)	130°C – 2 horas	32,24 ± 1,55
Humedad (%)	-	9,35 ± 2,06
	-	4,05
	-	6,05 ± 0,1
Proteína (%)	-	16,05 ± 0,2
	Base seca	22,57 ± 0,13

**Fuente:** Yate, A., Evaluación del proceso de extracción del aceite de Jatropha curcas L. para la producción de biodiésel, 2013

#### 1.5.4. Propiedades Físico-Química de aceite de Jatropha

Las investigaciones reportadas en la literatura caracterizan el aceite de Jatropha como se detalla en la Tabla 2. El aceite tiene bajo contenido de ácidos grasos libres, lo que ayuda a la estabilidad durante el tiempo de almacenamiento. El alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados permite que el fluido se conserve en estado líquido.

**Tabla 2 Parámetros de Aceite de Jatropha**

Propiedad	Condiciones	Valor
Densidad (g/ml)	20°C	0.9
Gravedad específica	-	0,88
Humedad (%)	105-110°C / 1h	0.2
Índice de saponificación (mg KOH/g)	-	180,60 – 208,27
Índice de yodo	-	100,10 – 138,90
Valor ácido (mg KOH/g)	-	6,02 – 26,75
Índice de cetano	-	23,00
Poder calorífico (MJ/kg)	-	33,00
Punto de fluidez (°C)	-	-6
Punto de inflamación (°C)	-	186
Viscosidad dinámica (cp)	Temp Ambiente – 10 rpm	42,88
Oleico (%)	-	30,20 – 50,30
Linoleico	-	23,20 – 53,30
Palmítico	-	18,22 – 19,68
Poliinsaturados	-	33,00 – 53,30

**Fuente:** Yate, A., Evaluación del proceso de extracción del aceite de Jatropha curcas L. para la producción de biodiésel, 2013

#### 1.5.5. Parámetro físico-químico de aceite refinado de palma

Las propiedades reportadas del aceite crudo de palma por (Avellaneda Vargas, 2010), se detallan en la Tabla 3.

**Tabla 3 Propiedades de aceite crudo de palma**

Propiedad	Norma	Valor
Densidad (g/ml)	ISO 55005	0,92
Viscosidad cinemática a 60°C (mm <sup>2</sup> /s)	ISO 3104	11,45
Humedad (ppm)	ISO 12937	125,8
Índice de insaponificable (% p/p)	ISO 18609	0,29
Índice de yodo (g de I/100g aceite)	ISO 3961	53,73
Índice de acidez (mg KOH/g de aceite)	ISO660	4,7
Ácidos Saturados (% p/p)	ISO 14103	48,81
Ácidos Insaturados (% p/p)	ISO 14103	51,08

**Fuente:** Avellana, F., Producción y caracterización de biodiésel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal, 2010

### **1.5.6. Tipos de Extracción**

En la industria de oleaginosas, existen diferentes técnicas de extracción que a lo largo de la historia se han modificado para obtener un producto con un uso final determinado. Por ejemplo, el aceite producto de la extracción con solventes orgánicos o fluidos en condiciones supercríticas (Calvo, 1995) es ampliamente usado por el sector farmacéutico, nutracéutico y cosmético. Por otro lado, los aceites extraídos por sistemas físicos o mecánicos, son procesados para consumo alimenticio (Moreno, 2011).

#### **1.5.6.1. Extracción por solvente**

El fundamento de este proceso se basa en la utilización de solvente para recuperar el aceite presente en las semillas. Los sistemas de control, automatización y recuperación de energía de los procesos de extracción de aceites por solventes, por lo general son costosos y complejos en su manejo. La tecnología extractiva consta de cuatro funciones elementales: extracción del aceite, remoción del solvente del medio, destilación y recuperación del solvente, en la industria oleaginosa el compuesto usado comúnmente es el n-hexano (Yate Segura, 2013). En la extracción por solvente se obtiene un aceite con menos impurezas que con la extracción mecanizada.

### 1.5.6.2. Extracción mecánica

El principio de este tipo de extracción se basa en la aplicación de presión (esfuerzo mecánico) sobre un área determinada en la semilla, rompiendo la estructura celular por presencia de fuerzas que eliminan los espacios intersticiales (Avellaneda Vargas, 2010) entre las estructuras de las semillas, como resultado final del efecto mecánico se produce la extracción de aceite.

### 1.5.7. Normativa para aceite de origen vegetal

El Instituto Nacional de Normalización Ecuatoriano (INEN) no contempla una normativa nacional vigente para la caracterización de aceites para producción de biocombustibles. Por tal razón, para el presente estudio se tomará como referencia la Norma DIN 51605 para evaluar algunos parámetros requeridos para aceites que serán utilizados en el proceso de obtención de biodiésel, tal como se detalla en la Tabla 4.

**Tabla 4 Parámetros para aceites vegetales no comestible**

Parámetro	DIN 51 605:2010-10		Unidad
	min	max	
Densidad (15°C)	910,0	925,0	Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad (40°C)	-	36,0	mm <sup>2</sup> /s
Poder calorífico	36,0	-	MJ/kg
Índice de yodo	-	125,0	G l/100 g
Índice de acidez	-	2,0	mg KOH/g
Punto de inflamación	101	-	°C

**Fuente:** Yate, A., Evaluación del proceso de extracción del aceite de *Jatropha curcas* L. para la producción de biodiésel, 2013

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Fases de la metodología

Para dar cumplimiento a los objetivos del proyecto, el mismo se dividió en dos etapas: La primera, consta de la caracterización de las semillas y extracción mecánica de la semilla para obtención de aceite crudo; y la segunda, se relaciona con la caracterización de aceite crudo y refinado. Las semillas fueron proporcionadas por la Estación Experimental del Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIAP, de la ciudad de Portoviejo, provincia de Manabí.

En la primera fase se estudia, las características morfológicas dimensionales de las semillas, tal como: diámetro aritmético, diámetro geométrico, esfericidad y volumen unitario. Así mismo, se determina, el porcentaje de humedad, densidad aparente, densidad real, y porosidad como propiedades físicas de las semillas (Betancur Prisco, Mira Hernández, & París Londoño, 2014).

La extracción mecánica del aceite crudo se efectúa por prensado hidráulico de las semillas, en éste, se analiza el comportamiento del rendimiento del aceite extraído de la torta expuesta a presión ejercida por el área del pistón.

La segunda parte del proyecto se enfoca directamente en el proceso de refinamiento del aceite crudo con el propósito de ajustar las propiedades operacionales Físico-Químicas para ser usado en una etapa futura dentro de una unidad experimental para obtención de biodiesel.

### 2.2. Caracterización morfológica dimensional de semillas de *Jatropha*

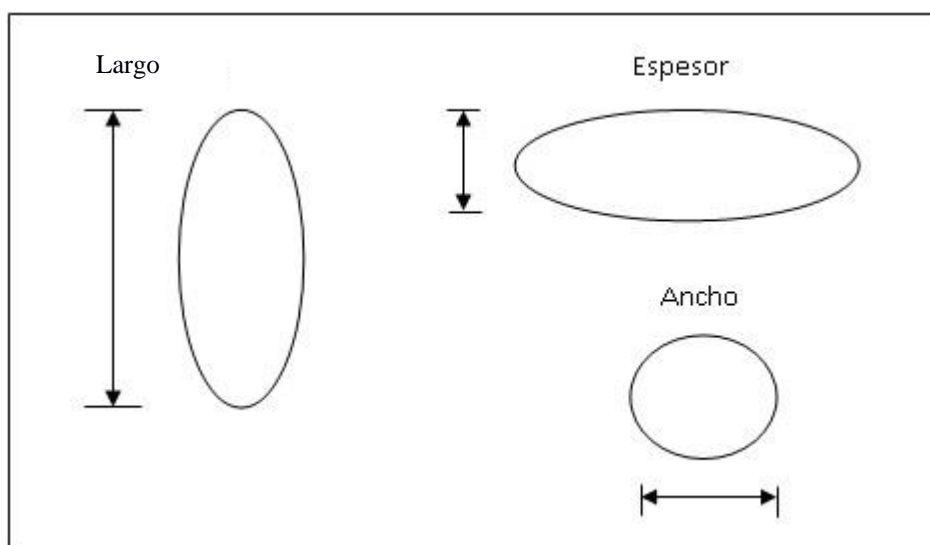
Para determinar propiedades físicas y morfológicas, se utilizó el método de muestreo de rutina (INEN, 1994) para seleccionar el número de semillas, mediante calibrador vernier (digital caliper 150), con resolución de 0.01mm, y precisión 0.02 mm. En la Figura 3, se muestra el sistema de referencia para registro de datos dimensionales. Las ecuaciones 1, 2, 3, y 4 son utilizadas para el cálculo de: diámetro promedio, diámetro geométrico, esfericidad, y volumen unitario, respectivamente.

$$\text{Diámetro arimético (Da)} = \frac{\text{Largo(L)} + \text{Ancho(An)} + \text{Espesor(Es)}}{3} \quad (1)$$

$$\text{Diámetro geométrico (Dg)} = \sqrt[3]{L \cdot An \cdot Es} \quad (2)$$

$$\text{Esfericidad } (\phi) = \frac{Dg}{X} \quad (3)$$

$$\text{Volumen unitario (Vu)} = \frac{4}{3} \pi (L \cdot An \cdot Es) \quad (4)$$



**Figura 3 Referencia para dimensiones de semillas de Jatropha**

Fuente: Aveiga-Peñafiel, 2017

Elaboración: Propia

### 2.3. Propiedades físicas de semilla de Jatropha

En la Tabla 5, se señala los tipos de ensayos para determinar los parámetros físicos de la semilla del estudio, tal como: densidad aparente, densidad real y porosidad.

**Tabla 5 Parámetros físicos de semilla de Jatropha**

Parámetro	Método	Unidad
Densidad aparente	Hectolítrico	g/cm <sup>3</sup>
Densidad real	Picnométrico NTE INEN-ISO 7971-1:2013	g/cm <sup>3</sup>

Fuente: INEN, 2012

La densidad aparente ( $\rho_a$ ), se define como la relación de la masa de semilla,  $M_p$  en g, contenida entre un volumen definido, en éste ensayo se utiliza una probeta de 500 ml, y una balanza CAS modelo 50001NF con capacidad de 5000 g, precisión de 0,1 g. Véase figura 4, en el cual se mide la masa contenida en 400 ml, véase ecuación 5.

$$\text{Densidad aparente } (\rho_a) = \frac{M_p}{400} \quad (5)$$



**Figura 4 Pesado de muestra de semilla en la probeta**

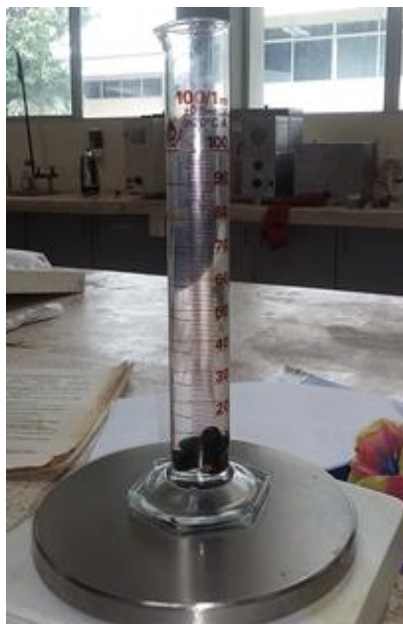
Fuente: Aveiga-Peñañiel, 2017

Elaboración: Propia

La densidad real ( $\rho_r$ ) de semilla de *Jatropha*, definida como la relación entre peso de la muestra y su volumen, es calculada mediante la norma NTE INEN-ISO 7971-1:2013. Para lo cual, utiliza una probeta con capacidad de 100 ml de volumen, e Isooctano marca Merck con pureza de 99.8%, véase figura 5. Finalmente, el cálculo de porosidad ( $\varepsilon$ ) de semillas de *Jatropha*, se expresa mediante la ecuación 6.

$$\text{Porosidad } (\varepsilon) = \frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r} \cdot 100 \% \quad (6)$$





**Figura 5 Pesado de muestra de semilla con Isooctano**

Fuente: Aveiga-Peñafiel, 2017

Elaboración: Propia

#### **2.4. Cálculo de rendimiento de aceite crudo en la extracción mecánica**

El rendimiento de extracción de aceite crudo,  $Re$ , (% en peso), es calculado de la siguiente manera: Primero se pesa la cantidad de semilla ( $M_s$ ) en kg, estas se depositan en el volumen completo del extractor (prensa hidráulica, máxima 10 000 psi). Después de la extracción del aceite, se procede a pesar la torta ( $M_t$ ) en kg, y con la ecuación 7, se obtiene el rendimiento de aceite crudo. Véase fotografías de proceso en apéndice 1

$$\text{Rendimiento de extracción } (Re) = \left(1 - \frac{M_s}{M_p}\right) \cdot 100 \% \quad (7)$$

#### **2.5. Caracterización de aceite crudo y refinado de Jatropha**

El aceite crudo se obtuvo por extracción mecánica, mientras que el aceite refinado se lo procesó con la técnica reportada por (Lafargue Pérez & Barrera Vaillant, 2012). Con esta técnica se procedió a realizar el refinamiento de aceite crudo para obtener el rendimiento total y de cada etapa como: filtración, desgomado y neutralización. Véase figura 6.

## Diagrama de flujo

Refinado de aceite de semilla de Jatropha Curcas

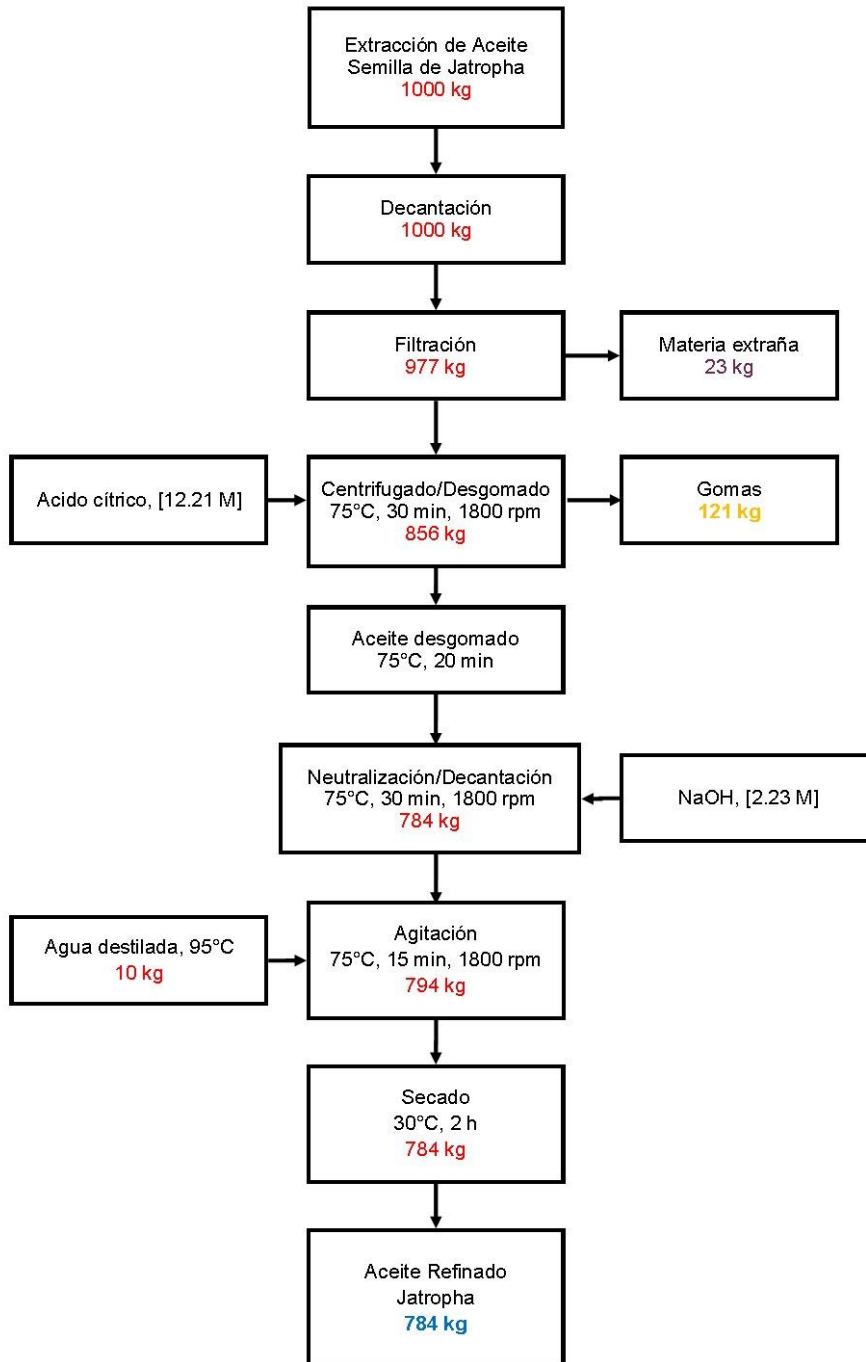


Figura 6 Diagrama de flujo para refinamiento de aceite crudo de Jatropha

Fuente: (Lafargue Pérez & Barrera Vaillant, 2012)

La Tabla 6 detalla los parámetros de ensayos para el aceite crudo y refinado del presente estudio.

**Tabla 6 Ensayos para caracterización de aceite**

Parámetro	Norma
Densidad (15°C)	ASTM D 1298
Viscosidad cinemática(40°C)	ASTM D 445
Índice de yodo	EN 14111
Índice de acidez	NTE INEN-ISO 660:2013
Punto de inflamación	ASTM D 93
Poder calorífico	ASTM D240
Índice de refracción	NTE INEN 42

Fuente: INEN, 2012

A continuación, se resume la metodología utilizada para la determinación de cada uno de los parámetros que se establecen en la tabla antes mencionada.

**La densidad:** Es una propiedad intensiva de la materia que relaciona la masa contenida en un volumen determinado, en el Sistema Internacional de Unidades se la expresa como kg/m<sup>3</sup>. La densidad del aceite crudo como el aceite refinado se mide mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM D 1298. Para su cuantificación se emplea un densímetro con rango de 0.9 a 1.1, marca Stevenson Reeve.

El aceite crudo se filtra previamente para la determinación de la densidad, se utiliza un embudo con lana de vidrio sobre la boca de un matraz erlenmeyer, seguidamente se vierte el aceite crudo para separar materia extraña o suciedad proveniente de la extracción mecánica.

El aceite filtrado es trasladado hacia una probeta de 500 ml. Finalmente, se introduce un densímetro con escala de 0.9 a 1.1 g/ml, se observa el valor numérico de la escala instrumento cuando éste haya estabilizado su flotabilidad. Véase figura 7.



**Figura 7 (a) Kit de filtración para aceite crudo; (b) Determinación de la densidad de aceite**  
Fuente: Aveiga-Peñañiel, 2017  
Elaboración: Propia

**Viscosidad cinemática:** Es la relación que existe entre la viscosidad dinámica con la densidad del fluido (Mott, 2006), se expresa en el S.I como Pa·s. La viscosidad dinámica es la propiedad de un fluido al someterse a un desplazamiento sobre otra superficie por el efecto de un esfuerzo cortante (Mott, 2006). La viscosidad cinemática se determina con el procedimiento señalado en la norma ASTM D 445.

**Índice de Yodo:** Su valor numérico establece el grado de insaturación de los ácidos grasos presente en la muestra de aceite o grasa. Se calcula mediante la norma EN 14111, se utiliza el instrumental requerido y reactivo para la obtención del parámetro.

**Índice de acidez:** Es el número de miligramos de hidróxido de potasio (KOH) que necesita un (1) gramo de muestra de aceite o grasa para neutralizar la acidez libre. El índice de acidez o valor ácido se determina mediante la norma NTE INEN-ISO 660:2013.

La muestra de aceite (20 g) es pesada en una balanza analítica utilizando un matraz Erlenmeyer, acorde a la norma. Se agregan 50 ml de alcohol etílico para disolver la muestra en el matraz, se añade 10 gotas de indicador de fenolftaleína. Posteriormente, con una bureta se realiza la titulación de la muestra con solución valorada de 0.1 N de hidróxido de potasio (KOH). Se agita la muestra hasta mantener una coloración violeta de al menos 30 segundos, como se muestra en la figura 8.



**Figura 8: (a) Pesado de muestra de aceite; (b) Punto de equivalencia para titulación**

Fuente: Aveiga-Peñafiel, 2017

Elaboración: Propia

**Punto de inflamación:** Es la temperatura mínima donde el aceite produce la cantidad necesaria de vapores para inflamarse instantáneamente durante la aplicación de una llama, se mide en °C (Tormos, 2005). En el punto de inflamación se observa el valor numérico en el termómetro con el protocolo descrito en la norma ASTM D 93. Se emplea un probador de copa abierta Pensky-Martens para tal efecto, véase figura 9.

Inicialmente la muestra es colocada en la copa de Pensky-Martens hasta la línea de enrase, se sumerge el termómetro 6 mm en la muestra, luego se somete a calentamiento el aceite mientras se observa vapores emitidos por el mismo, se estabiliza la llama (longitud aproximada de 2 mm) y se bordea la misma sobre la muestra buscando la primera combustión de los vapores.



**Figura 9 Sistema para obtención de punto de inflamación**

Fuente: Aveiga-Peñañiel, 2017

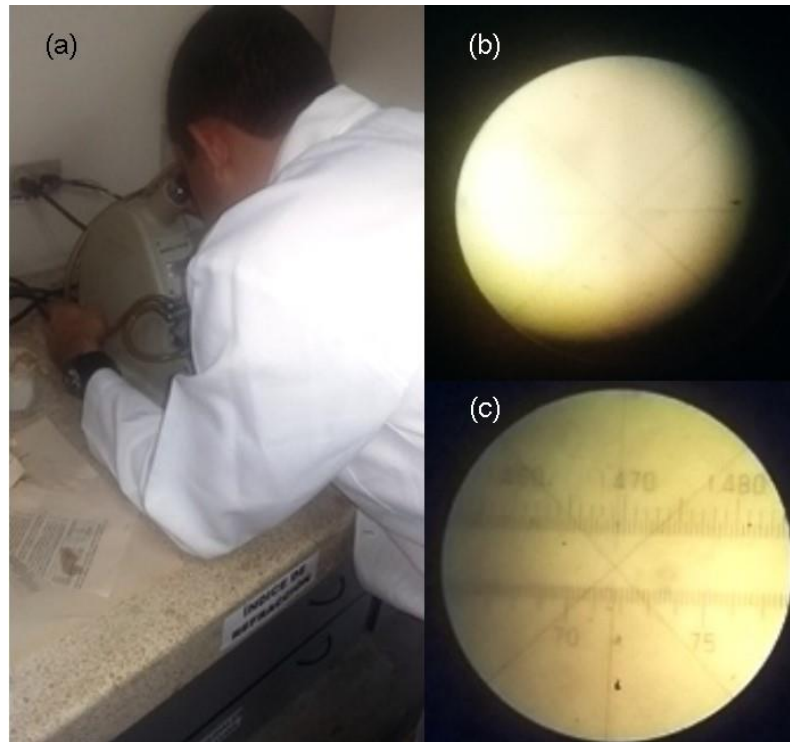
Elaboración: Propia

**Índice de refracción:** Es la relación de senos de ángulos entre la luz monocromática del ambiente que incide sobre una la sustancia determinada, para su determinación se empleó la norma NTE INEN 42:1973. El instrumental que se utiliza para este ensayo es el refractómetro de Abbe, rango de 1.31 a 1.71. Para la lectura de la muestra, las superficies de los prismas (es colocada) deben estar limpios y secos, posteriormente la muestra de aceite sobre el prisma inferior, se cierra el sistema con ambos prismas quedando una capa homogénea de la muestra. Finalmente, se ajustan los controles del refractómetro para enfocar los campos oscuro e iluminado centrados en el retículo para determinar la lectura correcta de la medición. Ver figura 10.

La lectura del valor numérico del índice de refracción de la muestra<sup>1</sup> se debe de observa entre una escala de valores de 1.460 a 1.480.

---

<sup>1</sup> Muestra de aceite crudo del presente estudio



**Figura 10 : (a) Determinación de índice de refracción de la muestra; (b) Campo oscuro e iluminado; (c) Escala numérica de refractómetro de Abbe**

Fuente: Aveiga-Peñañiel, 2017

Elaboración: Propia

**Poder Calorífico:** Es la cantidad de energía que libera una cantidad de masa en una reacción de combustión, en el sistema internacional se expresa en J/g. Los instrumentos para la medición son: un calorímetro IKA C200, una pipeta graduada y una balanza analítica marca Adam modelo PW254 con capacidad de 250 gramos y precisión de 0,0001 g.

Se pesa alrededor de 1 gramo de muestra de aceite en un crisol, luego se procede a colocar una hebra de hilo en el cable de ignición con el propósito de sumergirla en la muestra. Seguidamente se arma todo el contenedor de descomposición para presurizarlo con oxígeno a 30 bar y así poder ingresar el contenedor a la cámara del equipo para el ensayo. Se procede con el ingreso del dato de la masa de la muestra en el equipo utilizando el display frontal, después se agrega agua a 20°C en el reservorio con una probeta. Finalmente, se cierra el equipo para el inicio de la prueba experimental, véase figura 11.





**Figura 11 : (a) Pesado de muestra de aceite en el crisol; (b) Embebido de hilo en muestra de aceite; (c) Presurizado del contenedor de descomposición con oxígeno; (d) Ingreso de datos en el equipo**

Fuente: Aveiga-Peñañiel, 2017

Elaboración: Propia

## **2.6. Análisis de costos para implementación de planta piloto de extracción y refinamiento de aceite de Jatropha.**

Con el propósito de ejecutar la conveniencia de un proyecto de inversión para la extracción de aceite proveniente de semillas de *Jatropha Curcas*, se realizó un análisis costo-beneficio mediante la aplicación de dos indicadores de rentabilidad: la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN).

En el análisis de costos se utilizaron como variables: inversión tecnológica, materia prima, mano de obra, costos fijos, insumos químicos, e ingresos. La cantidad de aceite obtenido se establecerá con los rendimientos de extracción mecánica y de refinamiento de aceite crudo obtenidas de las pruebas experimentales.



# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Caracterización de semilla, aceite crudo y aceite refinado de *Jatropha*

La característica morfológica de la semilla de *Jatropha* tiene una relación directa sobre el contenido total de aceite presente en la misma (Zavala del Angel Ivan, 2016). En este sentido, es importante realizar un análisis sobre sus propiedades dimensionales antes de iniciar el proceso de extracción mecanizada. A continuación, se presenta los resultados de la caracterización de semilla, proceso de extracción, y pretratamiento requerido para el refinamiento del aceite crudo.

### 3.2. Caracterización de semillas de *Jatropha*

Se recolectó una muestra de 100 semillas para la cuantificación de Largo, Ancho y Espesor. Los datos obtenidos fueron de muestras proporcionada por el Centro Experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias-INIAP, de la ciudad de Portoviejo, provincia de Manabí.

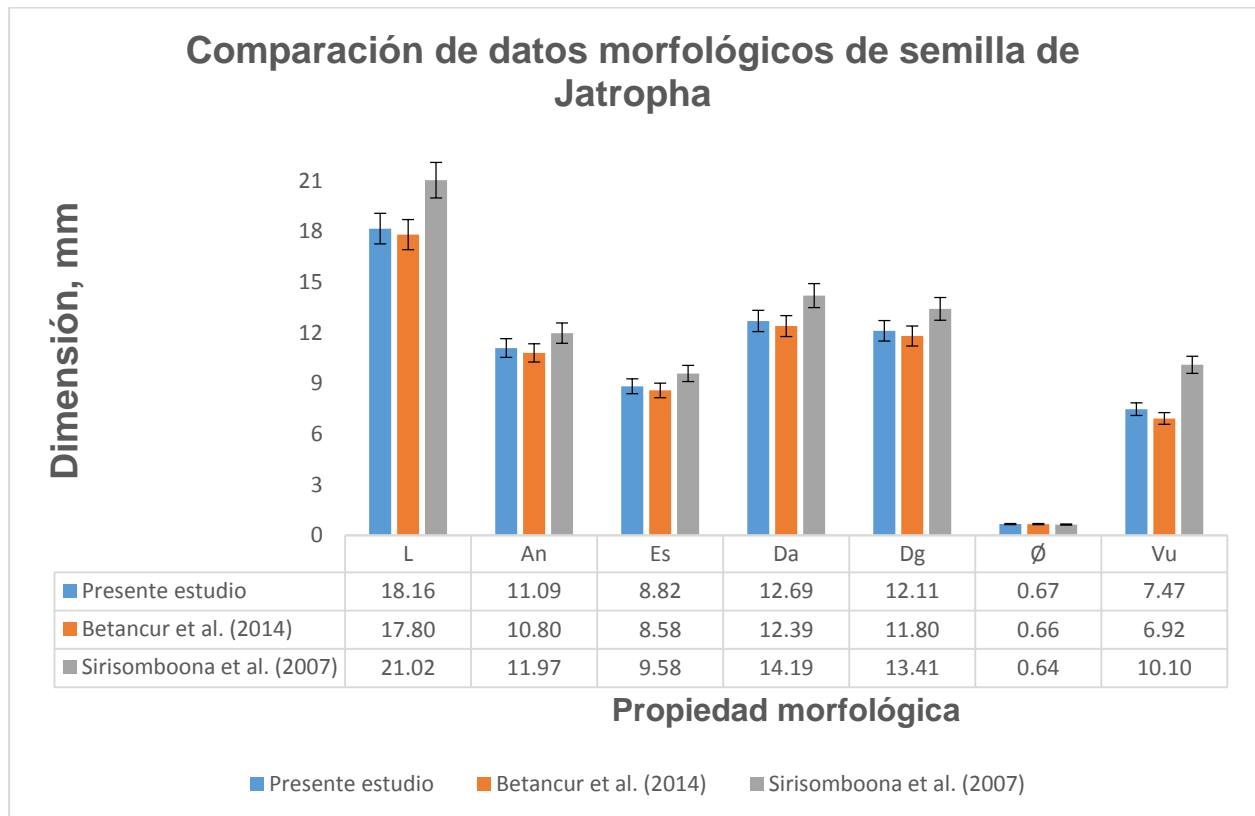
**Tabla 7 Datos morfológicos de semillas de *Jatropha* (valor medio  $\pm$  desviación estándar)**

Nº Muestra 100	Semilla de estudio Dimensión (mm), valor	(Betancur Prisco, Mira Hernández, & París Londoño, 2014) Valor medio
Largo, L (mm)	18.157 $\pm$ 0.0742	17.80 + 0.60
Ancho, An (mm)	11.089 $\pm$ 0.0428	10.80 + 0.64
Espesor, Es (mm)	8.8247 $\pm$ 0.0365	8.58 + 0.71
Propiedad dimensional		
Diámetro aritmético, Da (mm)	12.6903 $\pm$ 0.0459	12.39 + 0.45
Diámetro geométrico, Dg (mm)	12.1099 $\pm$ 0.0431	11.80 + 0.51
Esfericidad, Ø	66.71 $\pm$ 0.0011	66.30 + 3.50
Volumen unitario Vu (cm <sup>3</sup> )	7.4667 $\pm$ 0.0794	6.92 + 0.54

Elaborado por: Aveiga-Peñañiel, 2017  
Fuente: Propia

En la Tabla 7 se comparan los datos numéricos entre dimensiones morfológicas de semilla de *Jatropha* obtenidos en el presente estudio con lo reportado por (Betancur Prisco, Mira Hernández, & París Londoño, 2014).

En el figura 12, se muestra la semejanza que existe entre la semilla de *Jatropha* del estudio versus los datos reportados por (Betancur Prisco, Mira Hernández, & París Londoño, 2014) y (P. Sirisomboona, 2007).



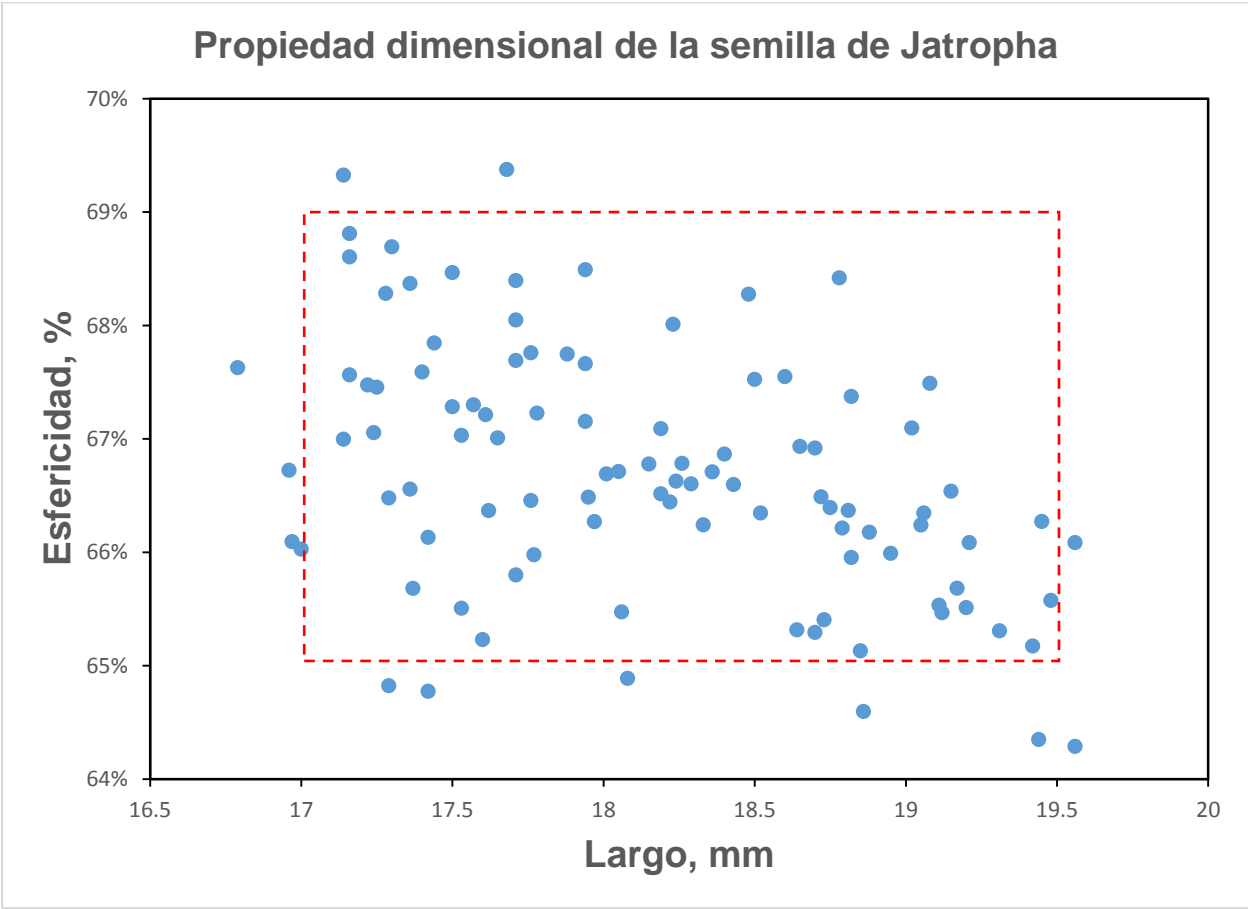
**Figura 12 Comparación de propiedades morfológicas entre Betancur et al. (2014), P. Sirisomboona, 2007 con el presente estudio.**

Fuente: Aveiga-Peñañiel, 2017

Elaboración: Propia

Los valores presentes en la figura 12 para los parámetros largo (L), ancho (An) y espesor (Es) así como los parámetros que dependen de las medidas antes detalladas es decir diámetro aritmético (Da), diámetro geométrico (Dg), esfericidad ( $\emptyset$ ) y volumen unitario, son similares a los reportados (valor medio incluido desviación estándar) por (Betancur Prisco, Mira Hernández, & París Londoño, 2014) y (P. Sirisomboona, 2007). Sin embargo, todos los parámetros reportados por (P. Sirisomboona, 2007) son mayores a los obtenidos por (Betancur Prisco, Mira Hernández, & París Londoño, 2014) y a los estimados del presente estudio. Este comportamiento es atribuido porque la dimensión larga (L) está afectando en las ecuaciones matemáticas de dimensiones utilizadas para las determinaciones de los parámetros, cabe acotar que las semillas utilizadas en dicho estudio son de origen hindú.

En la figura 13 se detalla la relación de esfericidad con la dimensión Largo en la semilla de *Jatropha* del presente estudio (cuadro de líneas punteas de color rojo). Se puede observar que existe un rango de concentración de esfericidad de 65 a 69 %, mientras que la dimensión Largo comprende un rango entre 17 a 19.5 mm. Es importante mencionar que la esfericidad es un factor a considerar para seleccionar la semilla con propiedades morfológicas adecuadas (Zavala del Angel Ivan, 2016) que conlleve a extraer una mayor cantidad de aceite durante el proceso de extracción.

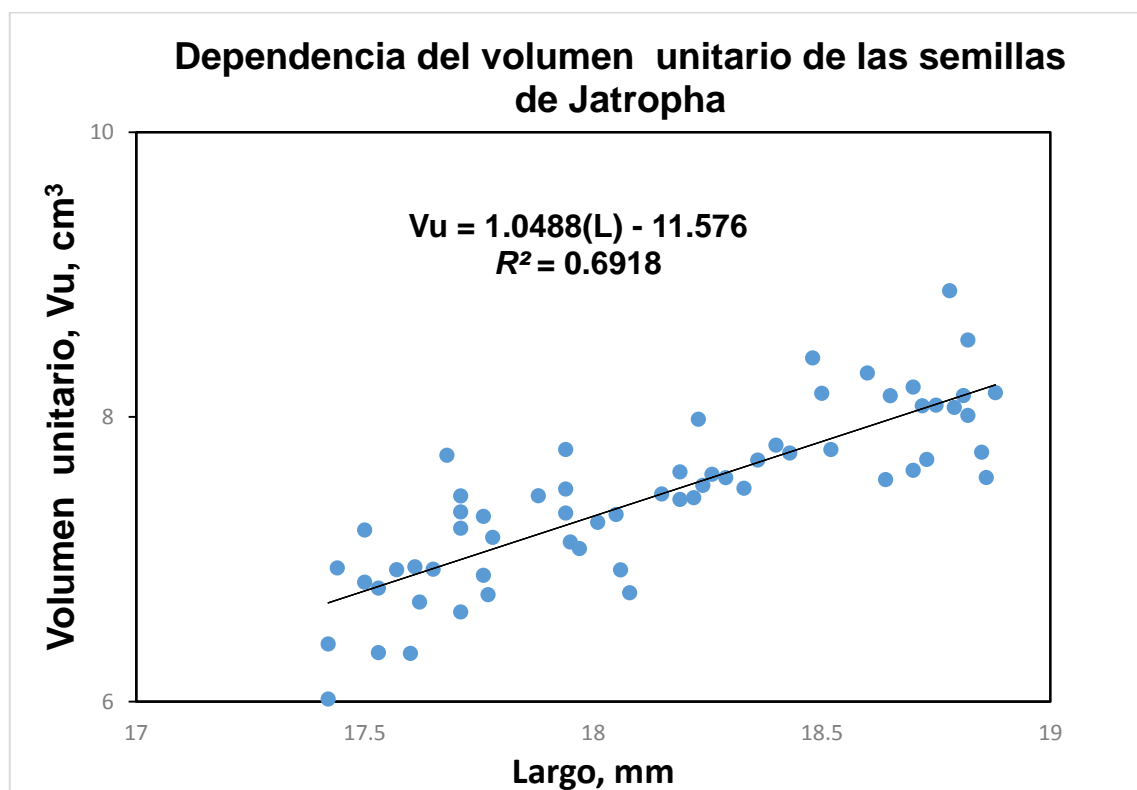


**Figura 13 Relación de esfericidad con la dimensión Largo en semilla de *Jatropha***  
 Elaborado por: Aveiga-Peñañiel, 2017  
 Fuente: Propia

Otro parámetro que guarda una relación directa con la dimensión Largo de la semilla sobre los datos obtenidos es el volumen unitario ( $\emptyset$ ). La figura 20 detalla, el análisis de regresión lineal entre estos dos parámetros mismos que presenta un factor de correlación  $R^2$  de 0.69. EL volumen unitario ( $V_u$ ), véase ecuación 8, tiene un comportamiento lineal con respecto a la dimensión Largo ( $L$ ), está relación queda como:

$$Vu = 1.0488(L) - 11.576$$

(8)



**Figura 14 Relación de Volumen Unitario con la dimensión Largo en semilla de Jatropha**

Elaborado por: Aveiga-Peñafiel, 2017

Fuente: Propia

Del análisis de las gráficas 13 y 14, nos ayuda a inferir que estos parámetros pueden ser sugeridos como una técnica de análisis para seleccionar las semillas con mayor contenido de aceite, y con ello, incrementar el índice de rendimiento en la extracción mecanizada que se propone en el presente estudio

### **3.3. Propiedad física de semillas de Jatropha**

#### **3.3.1. Densidad real, densidad aparente y porosidad**

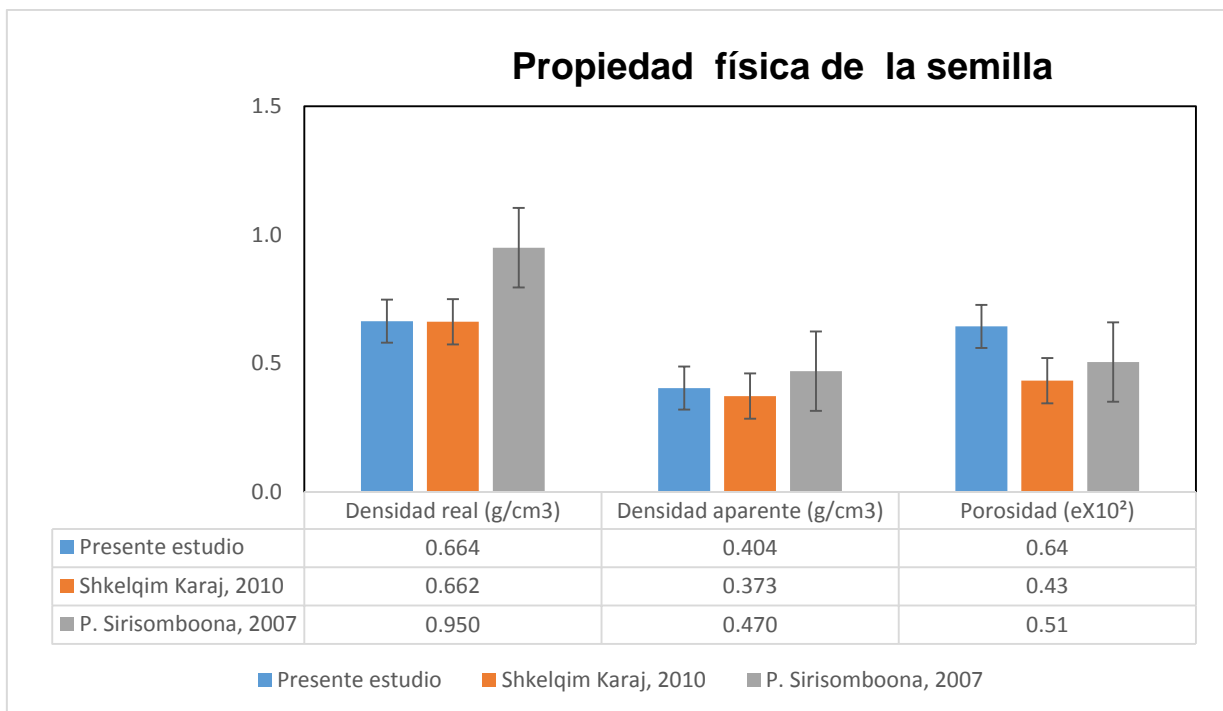
La densidad real, densidad aparente y porosidad de la semilla de Jatropha, fueron determinadas acordes a la metodología detallada en la sección 2.3, capítulo 2. La Tabla 8 muestra los datos obtenidos versus los datos reportados por (Shkelqim Karaj, 2010).

**Tabla 8 Valores físicos de semillas de Jatropha (valor medio + desviación estándar)**

Parámetro	Estudio	(Shkelqim Karaj, 2010)
Densidad real $\rho_r$ , g/cm <sup>3</sup>	0.664 ± 0.021	0.662 ± 0.013
Densidad aparente $\rho_a$ , g/cm <sup>3</sup>	0.404 ± 0.001	0.373 ± 0.004
Porosidad, %	64.39 ± 5.57	43.3 ± 1

Elaborado por: Aveiga-Peñafiel, 2017  
Fuente: Propia

Los datos de densidad real obtenidos de las muestras de semillas de Jatropha del presente estudio, son similares a los reportados por (Shkelqim Karaj, 2010), sin embargo son menores a los reportados por (P. Sirisomboona, 2007) véase figura 15; mientras que la densidad aparente de las semillas del presente estudio tiene un valor inferior a lo reportado por (P. Sirisomboona, 2007), pero superior a lo reportado por (Shkelqim Karaj, 2010). El valor de porosidad obtenido es inferior a lo reportado por los autores antes mencionados. Los resultados de éste comportamiento podría ser atribuido al origen y la especie de las semillas utilizadas del presente estudio.



**Figura 15 Comparación entre densidades y porosidad de semilla Jatropha**

Elaborado por: Aveiga-Peñafiel, 2017  
Fuente: Propia

### 3.4. Rendimiento de extracción de aceite crudo

Acorde a la metodología expuesta en la sección 2.4, capítulo 2. Los valores obtenidos en el rendimiento de extracción de aceite de semillas de *Jatropha*, se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9 Rendimiento de extracción de aceite de semillas de *Jatropha***

<b>Rendimiento Extracción de aceite</b>	<b>Valor g de aceite / 100 g de semilla</b>
Ensayo 1	16.7
Ensayo 2	17.6
Ensayo 3	17.2
Ensayo 4	12.7
Promedio	16.05 ± 1.1

Elaborado por: Aveiga-Peñañiel, 2017

Fuente: Propia

El rendimiento promedio obtenido fue de 16%. Este comportamiento está relacionado al sistema de extracción mecánico propuesto en éste trabajo. Es importante mencionar que estos rendimientos son inferiores a los obtenidos por otros estudios. (Fuel from Agriculture in Communal Technology-FACT, 2009) reportó 40 gramos de aceite por cada 100 gramos de semilla, mientras que (Yate Segura, 2013) reportó valores alrededor de 25.40. Cabe acotar que el uso del sistema de extracción propuesto complicaba la ejecución de los ensayos debido a la pérdida constante de fluido hidráulico del sistema afectando significativamente la extracción mecanizada y por ende el rendimiento del proceso propuesto.

Cabe mencionar que la estación experimental de INIAP-Portoviejo bordea un rendimiento de extracción de 28 a 31 gramos de aceite por cada 100 gramos de semilla valores que se podrían alcanzar con mejoras al sistema de extracción propuesto en el presente estudio.

### 3.5. Rendimiento de refinamiento de aceite crudo de *Jatropha* en pruebas experimentales

En el proceso de refinamiento de aceite crudo de *Jatropha* se obtuvo un rendimiento aproximado de 78%. Este rendimiento obtenido abarca los rendimientos de cada una de las etapas del proceso de refinamiento, tal como lo detalla la Tabla 10.

**Tabla 10 Rendimiento global y por etapas de refinamiento de aceite**

Rendimiento por Etapa			
Prueba	Filtrado	Desgomado	Neutralizado
1	98%	90.0%	91.0%
2	97%	87.0%	93.0%
3	98%	86.0%	91.0%
Promedio			
	97.7%	87.7%	91.7%
Rendimiento global (refinamiento)			
	78.49 %		

Elaborado por: Aveiga-Peñañiel, 2017  
Fuente: Propia

El valor promedio de la etapa de desgomado del presente estudio fue de 87.7 %, y este dato se encontró inferior a lo reportado por (Rovelo, 2009), 90.1 %. En el mismo estudio de (Rovelo, 2009) reporta un valor de 90.9 % para la etapa de neutralizado de aceite, mientras que en el presente estudio el rendimiento corresponde a 91.7 %. El rendimiento global de refinamiento de aceite crudo en todo el proceso es 78.49%.

### **3.6. Parámetros físicos-químicos de aceite de Jatropha**

#### **3.6.1. Densidad**

La Tabla 11 muestra, la comparación entre densidades de aceite crudo como aceite refinado del presente estudio. Se puede observar que la densidad del aceite crudo con el refinado, presentan una diferencia de alrededor de 0.3%.

Los valores de aceite crudo de este estudio difieren a los reportados por (Yate Segura, 2013) y (Lafargue Pérez & Barrera Vaillant, 2012) mismo que fueron 0.918 g/ml y 0.917 g/ml, respectivamente. Sin embargo, los datos obtenidos están dentro de los parámetros establecidos por la norma DIN 51 605:2010-10, con lo que se estaría dando cumplimiento de la misma.

#### **3.6.2. Punto de inflamación**

El punto de inflamación de la muestra de aceite crudo del estudio fue de 295°C (Tabla 11). (Yate Segura, 2013) y (Lafargue Pérez & Barrera Vaillant, 2012) reportaron valores 365°C y 268°C, respectivamente. De acuerdo a la norma DIN 51 605, se establece como

mínimo de 101°C para este parámetro. Por lo que, el aceite crudo de este estudio cumple con el requisito de la normativa.

### **3.6.3. Índice de refracción**

Los valores obtenidos para el aceite crudo y refinado presentan una diferencia cuantificada de 0.3% entre ambas muestras del presente trabajo (Tabla 11). Este mismo parámetro lo reporta (Betancur Prisco, Mira Hernández, & París Londoño, 2014) con un valor de 1.469.

Este parámetro no está referido en la norma, sin embargo, es importante su cuantificación debida que se puede utilizar como índice para comprobación de pureza (Plank, 2005) de aceites, mezclas de ácidos grasos, y de disolventes.

### **3.6.4. Índice de Yodo**

El resultado experimental del parámetro de índice o valor de yodo para la muestra de aceite crudo fue de 97.42 g I/100g (Tabla 11), como efecto de mayor presencia de ácidos grasos insaturados. Por otro lado, (Betancur Prisco, Mira Hernández, & París Londoño, 2014) reportaron un valor de 88.65 g I/ 100 g. Este parámetro indica el grado de instauración de los ácidos grasos presente en la muestra.

### **3.6.5. Índice de acidez**

Analizando los rangos permitidos en la norma DIN 51 605:2010 para el parámetro índice de acidez, la misma indica que existe un límite máximo de 2 mg KOH/g sobre la muestra. De acuerdo a la evidencia de los datos del estudio y a lo reportado por (Lafargue Pérez & Barrera Vaillant, 2012) y (Yate Segura, 2013), se observa que los valores de 4.829 y 11.84 supera a lo establecido a la normativa.

Esto es un indicativo que la disponibilidad de ácidos grasos libres será mayor en un proceso de transesterificación lo cual afectaría al rendimiento de obtención de biodiesel.

### **3.6.6. Poder calorífico**

El poder calorífico de las muestras de aceite crudo y refinado está dentro del límite mínimo que establece la normativa de referencia mismo que guarda relación con lo reportados por (Yate Segura, 2013) y otros estudios. Véase la Tabla .11



**Tabla 11 Comparación de parámetros físico-químico de aceite de Jatropha**

Parámetro	Valor <sup>2</sup>	Valor <sup>3</sup>	Valor Aceite crudo de estudio	Valor Aceite refinado de estudio
Densidad, g/ml	0.918 ± 0.21	0.917	0.911 ± 0.0	0.914 ± 0.0
Punto de inflamación, °C	326.5 ± 6.0	268	295 ± 0.0	300 ± 0.0
Índice de refracción	-	-	1.4695 ± 0.0	1.469 ± 0.0
Índice de yodo, g Yodo / 100 g	101.0 - 135.90	-	97.42	-
Índice de acidez, mg KOH / g	1.159 ± 0.016	11.84	4.829 ± 0.066	-
Poder calorífico (J/g)	39 221± 33.0	-	38 274.35 ± 32.415	38 051.5 ± 61.5
Punto de fluidez (°C)	-	-5	-5	-9
Viscosidad cinemática (cSt)	-	33.89	36.93	38.15

Elaborado por: Aveiga-Peñafiel, 2017

Fuente: Propia

### 3.7. Análisis de costos

Para la ejecución de un proyecto de inversión para una planta de extracción mecánica y refinamiento de aceite crudo de Jatropha, se requiere de una inversión inicial de USD 100 000 para la adquisición de equipos para el procesamiento de 1000 kg diarios. El costo fijo anual para el pago de personal asciende a USD 63 000, mientras que los costos relacionado al procesamiento de extracción mecánica y refinamiento corresponde a USD 30 555. A continuación, se detallan los valores antes mencionados en la sección 3.7.2.

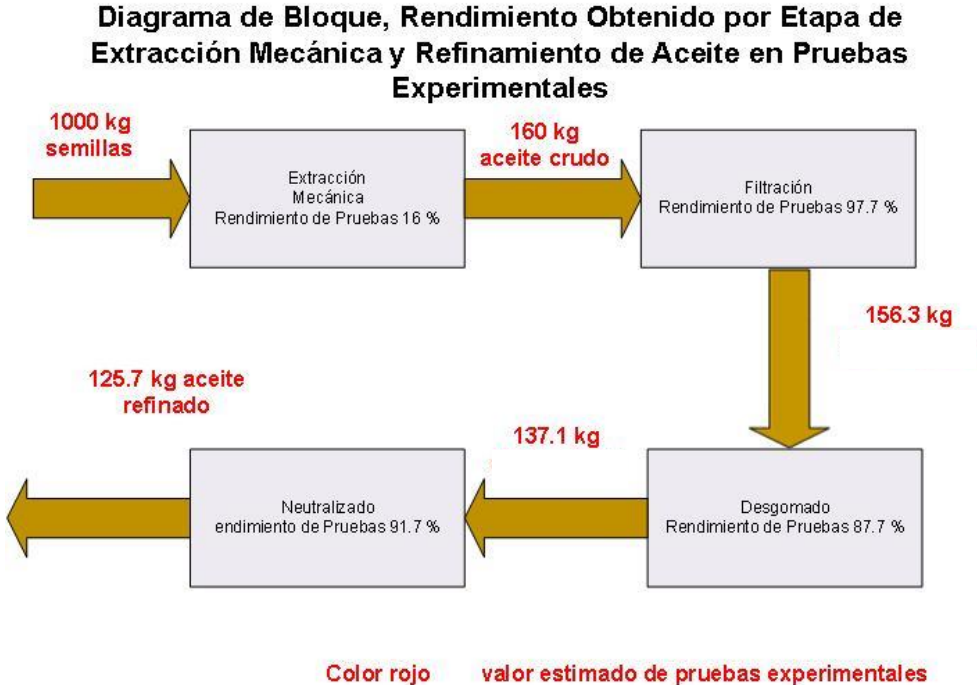
#### 3.7.1. Costos tecnológicos

Los cálculos se realizaron para una planta de extracción mecanizada de aceite capaz de procesar 1000 kg durante 8 horas de trabajo diario. El diagrama de equipos de la planta piloto de extracción mecánica y refinamiento de aceite crudo se presenta en el Apéndice

<sup>2</sup> (Yate Segura, 2013)

<sup>3</sup> (Lafargue Pérez & Barrera Vaillant, 2012)

2. Se considera que la planta operara 8 horas por día, durante 25 días por 12 meses, obteniendo una capacidad de 300 t/año, con un rendimiento total de 47.09%, es decir, 141.27 t/ año. Los costos de recolección, transporte y limpieza de semillas son excluidos en este análisis. En la figura 16, se muestran los rendimientos experimentales de las pruebas de cada una de las etapas, iniciando desde la extracción mecánica hasta de refinación del aceite crudo, teniendo presente el rendimiento de equipo utilizado en el presente estudio el cual es de 16%. Por otro lado, se propone trabajar con una eficiencia de 60% para los cálculos de estimación, en el apéndice 3 se muestran los valores de las estimaciones relacionados a los rendimientos.



**Figura 16 Rendimiento de cada etapa del proceso de refinamiento de aceite**  
 Elaborado por: Aveiga-Peñafiel, 2017  
 Fuente: Propia

La planta de extracción inicia su proceso con el prensado de las semillas con un extractor mecanizado, seguido de una decantación (2 horas) para eliminar materia extraña, luego pasa a un proceso de filtración con el objetivo de separar de partículas menores a 10 micrones.

Posteriormente, en un tanque de agitación se somete a calentamiento durante 30 minutos el aceite refinado con una solución de ácido cítrico de concentración de [12.21M]. La mezcla se centrifuga para efectuar el proceso de desgomado del aceite y

finalmente se realiza la neutralización del aceite con una solución de hidróxido de sodio ([2.23 Molar]). Véase el diagrama de flujo de la sección 2.5. La Tabla 12 presenta los costos relacionados a la tecnología necesaria para la extracción de aceite.

**Tabla 12 Maquinaria requerida para extracción de 36 t/año de aceite de Jatropha**

Equipos	Unidad	Costo (USD)	Proveedor
Extractor (extrusor)	1	7 900	Henan New Elephants Machinery
Tanque de agitación (0.5 m <sup>3</sup> )	2	6 000	Shanghai Beyond Machinery
Centrífuga	1	8 100	Liaoning Fuyi Machinery
Tanque de almacenamiento (5 m <sup>3</sup> )	1	12 000	Metal Mecánica Campos
Tanque de almacenamiento plástico (1 m <sup>3</sup> )	5	2 000	Plastigama
Accesorios y Obra civil	1	64 000	B&B Construcciones
Total		100 000	

Elaborado por: Aveiga-Peñafiel, 2017  
Fuente: Propia

### 3.7.2. Costos fijos

El costo del personal se calculó por 8 horas, laborando 25 días al mes durante 12 meses al año. Para la estimación de este costo se consideró el Salario de remuneración básico vigente al 2017, USD 375 que incluye las aportaciones que dispone la ley. Véase Tabla 13.

**Tabla 13 Costos fijos de personal por año de actividad**

Personal	Unidad	Costo / año (USD)
Gerente	1	36 000
Administrativo	1	8 400
Ingeniero de Planta	1	9 600
Operarios	2	9 000
Salario Total		63 000

Elaborado por: Aveiga-Peñafiel, 2017  
Fuente: Propia

El mantenimiento de los equipos se estableció en un 4 % de la inversión inicial para cada uno de ellos. Se consideró el pago de alquiler de una instalación con todos los servicios básicos. Así mismo, el valor aproximado de almacenamiento de las semillas de *Jatropha* como el aceite refinado requerirá de un lapso de tres meses que dura la cosecha en donde se efectuará la extracción y refinamiento. La Tabla 14, presenta los costos asociados al proceso de extracción y refinamiento por un año de producción de semilla de *Jatropha*. En el apéndice 4 se detallan los valores estimados para los costos anuales de consumo de los equipos.

**Tabla 14 Costos de extracción de aceite y refinamiento anual**

Equipos	Consumo Nominal (Kw)	Unidad	Consumo Anual	Costo Anual (USD)
Extractor (extrusor)	30	Kw-h	72 000	7 920
Tanque de agitación (500 litros)	7.5	Kw-h	18 000	1 980
Centrífuga	7.5	Kw-h	18 000	1 980
Mantenimiento de equipos, 4 % de inversión inicial.	-	-	-	1 440
Alquiler de local y bodega	-	1	14 400	14 400
Consumo de químicos				
Ácido cítrico	-	Kg	495	1 237.50
Hidróxido de sodio	-	kg	430.2	1 398.15
Total				30 355.65

Elaborado por: Aveiga-Peñañiel, 2017  
Fuente: Propia

### 3.7.3. Costo de la materia prima y precio de venta de aceite refinado

Con los datos obtenidos en pruebas experimentales de laboratorio para la extracción mecánica y refinamiento del aceite crudo, se realizó un balance de materia para la extracción de 1000 kg de semillas de *Jatropha*. En la actualidad, la siembra de plantaciones de *Jatropha* está centralizada en la provincia de Manabí. Se conoce que el precio al menudeo de un saco de 45 kg de semillas cuesta USD 16, éste valor fue proporcionado por INIAP, localizado en la ciudad de Portoviejo. En relación al precio de

aceite refinado, el personal de INIAP expende con un precio de referencia para un galón de aceite de USD 10. En la Tabla 15 se detallan los costos de materia prima. La cantidad de aceite refinado se obtiene mediante la razón entre la masa de aceite con el dato de densidad (aceite refinado) experimental.

**Tabla 15 Precio de semilla y aceite refinado**

	Unidad	Consumo anual	Costo (USD)	Costo Anual (USD)
Semilla	t	300	320	96 000
Aceite refinado	L	154 562 <sup>4</sup>	1.81	279 466.35

Elaborado por: Aveiga-Peñafiel, 2017  
Fuente: Propia

### 3.8. Análisis de resultados

El análisis de costo-beneficio para un periodo de 5 años se realizó mediante el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), con una tasa fija de 16.79% anual, y una inflación proyectada de 4% aplicado a los costos fijos del presente estudio. El detalle de estos rubros se encuentra en el apéndice 5.

**Tabla 16 Análisis de costo - beneficio de refinado de aceite de Jatropha**

Inversión Inicial (USD)	Rubros	AÑO 1 (USD)	AÑO 2 (USD)	AÑO 3 (USD)	AÑO 4 (USD)	AÑO 5 (USD)
-100 000	Ingreso	279 757	279 757	279 757	279 757	279 757
	Egreso	204 356	212 530	221 031	229 872	239 067
	Flujo Neto	75 111	66 936	58 435	49 594	40 399
VAN		82 416	TIR	59 %		

Elaborado por: Aveiga-Peñafiel, 2017  
Fuente: Propia

Los datos obtenidos de la Tabla 16 indican que el periodo de 5 años se recupera la inversión, ya que los flujos de entrada serían abastecidos por los ingresos de venta generada, la tasa interna de retorno estimada es de 59 % con un valor actual neto de USD 82 416, estimando un proyecto de inversión rentable.

<sup>4</sup> Cantidad en litros de aceite refinado=(Toneladas anual de semillas)\*(rendimiento total)/(densidad de aceite refinado;  $\{[(300000 \text{ kg})(0.4709)]/(914\text{kg/m}^3)\}=154.562 \text{ m}^3= 154 562 \text{ L}$

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las características morfológicas determinadas de las semillas utilizadas en el presente estudio son similares a las reportadas en estudios realizados en Colombia, África e India.
- La forma geométrica típica promedio de las semillas caracterizadas, corresponde a un elipsoide de tipo escaleno con una esfericidad promedio de 66%, este tipo de estructura morfológica está directamente relacionado al contenido de aceite en la semilla.
- El rendimiento de extracción mecánica obtenido es de 16 gramos de aceite por cada 100 gramos de semilla. Para la etapa total de refinamiento se alcanzó un valor de 78.49 %. El rendimiento de toda la operación, desde la extracción mecánica hasta el proceso de refinamiento corresponde a 12.6 %. En comparación con valores existentes en la bibliografía para el caso de semillas oleaginosas la eficiencia están alrededor del 24%.
- La densidad del aceite crudo (0.911g/mL) como el aceite refinado (0.914 g/mL) están dentro del rango establecido en la normativa DIN 51 605. Los resultados obtenidos revelan que no existe la necesidad de considerar un diseño especial para el transporte por tuberías durante el proceso del aceite a nivel industrial por lo que se podría utilizar las metodologías convencionales para su diseño.
- Las propiedades Físico-Químicas analizadas experimentalmente del aceite refinado de *Jatropha* presentan diferencia con el aceite de palma en: densidad, valor ácido y viscosidad cinemática.
- El análisis costo-beneficio de la propuesta presenta un VAN de USD 82 416 con una Tasa Interna de Retorno de 59%, lo que permite considerar la viabilidad económica del proyecto para su implementación.
- Los valores reportados de las caracterizaciones en el presente estudio están articulados a las condiciones cultivo, suelo, y clima de las semillas proporcionadas por parte del INIAP, las mismas que guardan similitud en valores morfológicos a los reportados por trabajos con semillas de otras regiones.

- Los resultados obtenidos en la extracción mecánica demuestran que existe la necesidad de generar un rediseño y optimización del sistema hidráulico de extracción utilizado, con el fin de evitar pérdidas de rendimiento.
- Es necesario buscar técnicas alternativas o protocolos de cuantificación para el parámetro de punto de inflamación de aceite de *Jatropha*, debido que los vapores durante la determinación experimental podrían poner en riesgo la integridad de la persona.

## BIBLIOGRAFÍA

Angulo Montesdeoca, R. G. (2008). *Medición y Evaluación de la calidad del aire en los sectores de Fertisa y Trinitaria de la ciudad de Guayaquil debido a la presencia de material particulado menor a 10 y 2.5 um.* (ESPOL, Ed.) Guayaquil.

Avellaneda Vargas, F. A. (2010). *Producción y caracterización de biodiesel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal.* Tesis doctoral, Tarragona.

Betancur Prisco, J. C., Mira Hernández, C., & París Londoño, L. S. (2014). Propiedades físicas y mecánicas de granos de *Jatropha Curcas* cultivadas en Colombia. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*(73), 187-199.

Calvo, L. y. (1995). Extracción supercrítica de aceite de semilla de girasol con dióxido de carbono. (J. O. Valderrama, Ed.) *Información Tecnológica*, 6(3), 89-93.

Campuzano Duque, L. F., Ríos, L. A., & Cardeño López, F. (2016). Caracterización composicional del fruto de 15 variedades de *Jatropha Curcas* L. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria*, 379-390.

Ecuador, A. N. (2008). *Constitucion Politica del Ecuador.* Montecristi.

Fuel from Agriculture in Communal Technology-FACT. (2009). *Manual de Jatropha.*

Gallego Picó, A., González Fernández, I., Sánchez Gimeno, B., Fernández Hernando, P., Garcinuño Martínez, R. M., Bravo Yagüe, J. C., . . . Durand, A. J. (2012). *Contaminación Atmosférica.* Madrid: UNED.

INEN. (27 de Octubre de 1994). Norma técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 233:95. *Granos y Cereales. Muestreo(NTE INEN 1233:95).* Quito, Pichincha, Ecuador.

Lafargue Pérez, F., & Barrera Vaillant, N. (2012). Caracterización físico-química del aceite vegetal de *Jatropha Curcas* L. *TECNOLOGÍA QUÍMICA*, 22(2), 162-165.

Moreno, M. C. (2011). *Evaluación y escalamiento del proceso de extracción de aceite de aguacate utilizando tratamiento enzimático.* Tesis Magister en Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Bogotá.

Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos.* México: Pearson Educación.

P. Sirisomboona, P. K. (2007). Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. *Biosystems Engineering*, 97, 201-207.

Petroecuador, E. (2016). *Informe de Rendición de Cuentas.* Quito.

Plank, R. (2005). *El empleo del frío en la industria de la alimentación.* Barcelona: Reverté.



Rovelo, F. H. (2009). *Diseño de una planta de extracción, semi-refinamiento y transesterificación de aceite de jatropha (Jatropha Curcas)*. Tesis de Ingeniería, Zamorano.

Shkelqim Karaj, J. M. (2010). Determination of physical, mechanical and chemical properties of seeds and kernels of *Jatropha curcas* L. *Industrial Crops and Products*, 32, 129-138.

Tormos, B. (2005). *Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado*. Barcelona: Reverté.

Yate Segura, A. V. (2013). *Evaluación del proceso de extracción del aceite de Jatropha curcas L. para la producción de biodiésel*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Bogotá.

Zavala del Angel Ivan, G. P. (2016). Características morfológicas de semillas, contenido de aceite y toxicidad en accesiones de *Jatropha Curcas* L. Recolectadas en Veracruz, México . *XXXIX Reunión Científica y Tecnológica Forestal y Agropecuaria Veracruz*.

# APÉNDICE

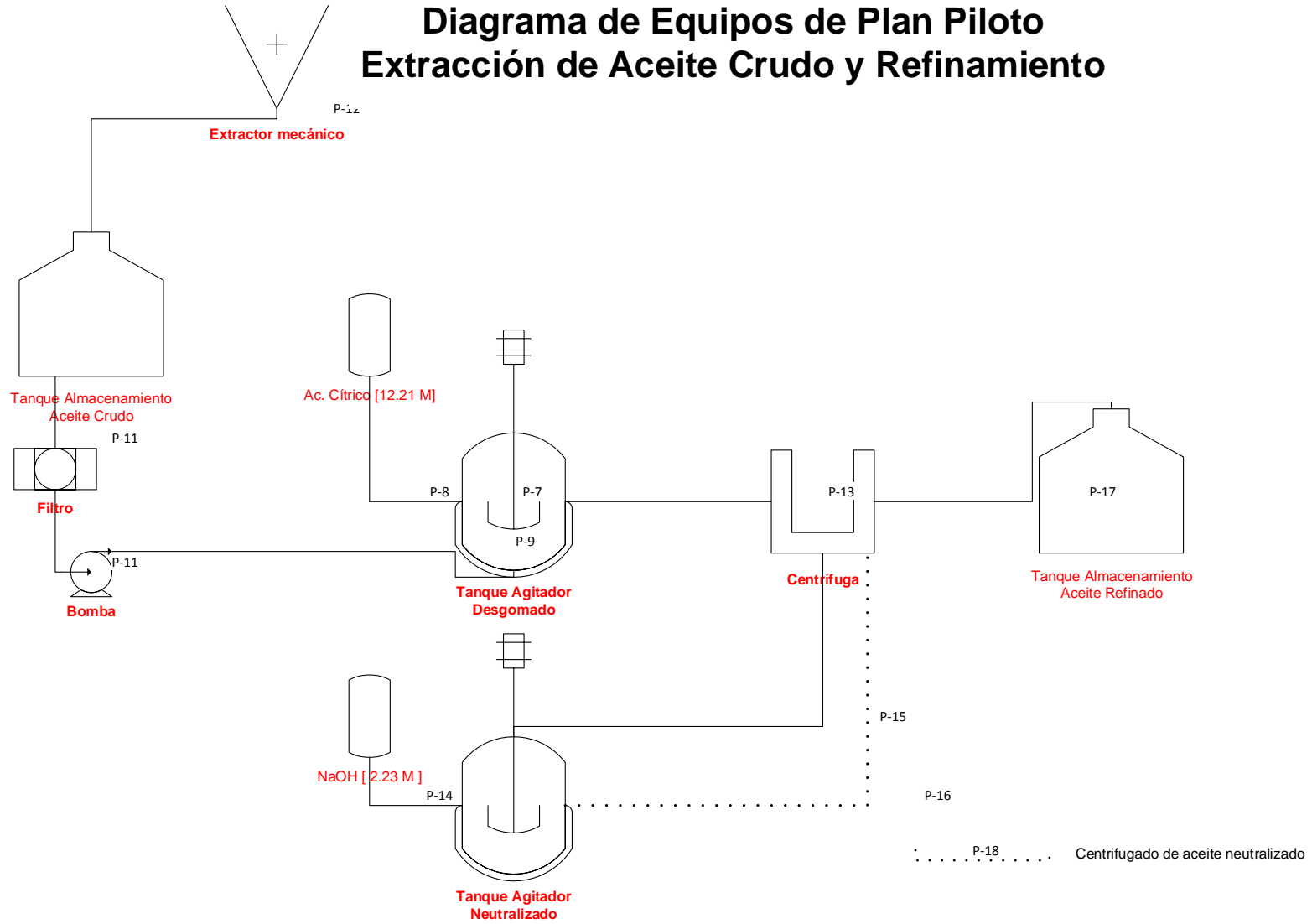
## Apéndice 1



Fotografías: (a) Prensa hidráulica, (b) bomba hidráulica, (c) disco de soporte y cilindro, (d) extracción de aceite, (e) tortas de pruebas experimentales realizadas.

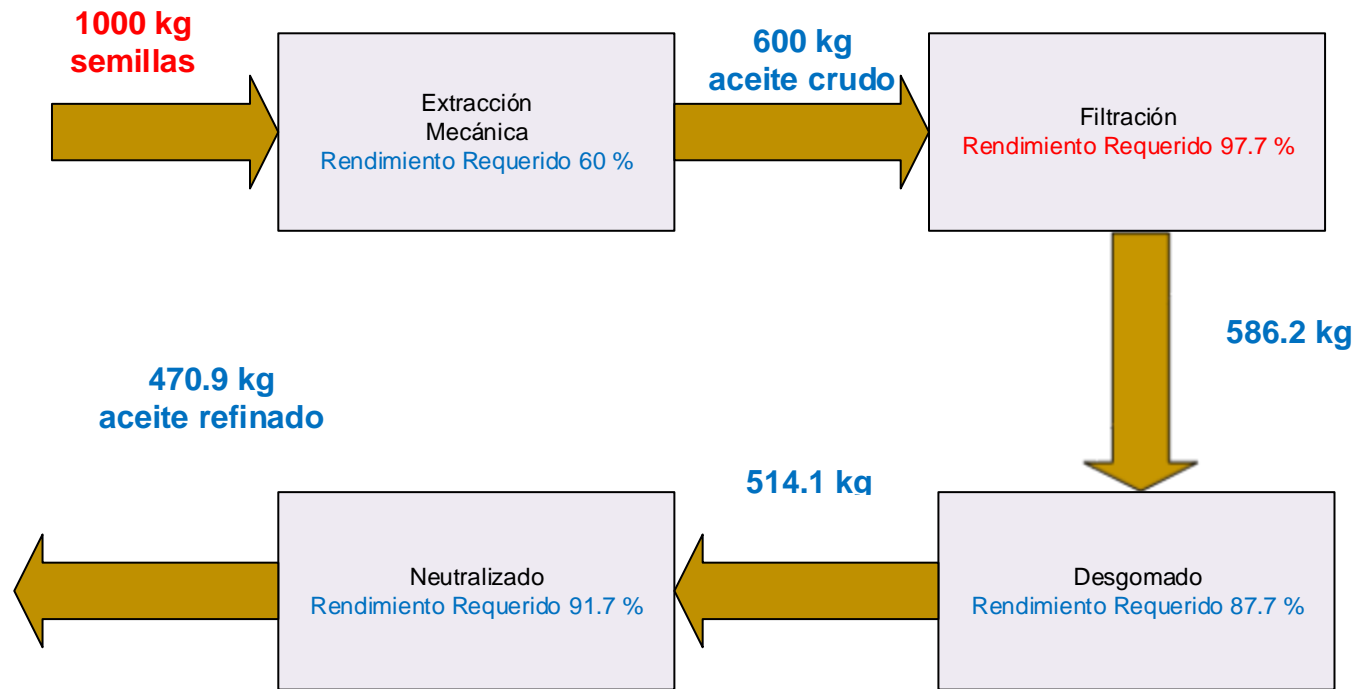
# Apéndice 2

## Diagrama de Equipos de Plan Piloto Extracción de Aceite Crudo y Refinamiento



# Apéndice 3

## Diagrama de bloque, rendimiento obtenido por etapa de extracción mecánica y refinamiento de aceite



Color azul

valor propuesto para Planta Piloto

## Apéndice 4

<b>Consumo de energía de equipos para planta piloto</b>							
	<b>Consumo (Kw)</b>	<b>horas/día</b>	<b>día/mes</b>	<b>mes/ año</b>	<b>Consumo (Kw) / año</b>	<b>Costo Kw- h / USD</b>	<b>Total USD</b>
<b>Extractor</b>	30	8	25	12	72 000	0,11	<b>7 920</b>
<b>Tanque de agitación (0,5 m3)</b>	7,5	8	25	12	18 000	0,11	<b>1 980</b>
<b>Centrífuga</b>	7,5	8	25	12	18 000	0,11	<b>1 980</b>
<b>TOTAL</b>					<b>108 000</b>		<b>11 880</b>

Realizado por: Aveiga-Peñafiel, 2017

## Apéndice 5

### Detalle de Análisis de costo - beneficio de refinado de aceite de Jatropha

Inversión Inicial (USD)		AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
<b>-100 000</b>	<b>Ingreso Total</b>	279 757	279 757	279 757	279 757	279 757
	Gastos					
	Electricidad	11 880	12 355	12 849	13 363	13 898
	Químicos	2 636	2 741	2 851	2 965	3 083
	Manteamientos de equipos	1 440	1 498	1 558	1 620	1 685
	Alquiler	14 400	14 976	15 575	16 198	16 846
	Personal	78 000	81 120	84 365	87 739	91 249
	Semillas	96 000	99 840	103 834	107 987	112 306
	<b>Egreso Total</b>	204 356	212 530	221 031	229 872	239 067
	<b>Flujo Neto</b>	75 111	66 936	58 435	49 594	40 399
VAN	<b>\$ 82 416</b>					
TIR	<b>59%</b>					

Realizado por: Aveiga-Peñafiel, 2017





**Gustavo Sixto Aveiga Ulloa**

[gaveiga@espol.edu.ec](mailto:gaveiga@espol.edu.ec)



**Franklin Alejandro Peñafiel Carpio**

[fapenafi@espol.edu.ec](mailto:fapenafi@espol.edu.ec)

# OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO PARA UNIDAD EXPERIMENTAL DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE REFINADO DE SEMILLAS DE *JATROPHA CURCAS*

El presente estudio se realizó para conocer las propiedades morfológicas de la semilla de *Jatropha Curcas*, nativa de la región de la costa. Es importante conocer la disponibilidad de semillas de oleaginosas de carácter no comestibles para aplicaciones en el campo de la bioenergía.

El aumento de las exigencias ambientales debido al aumento de las emisiones de fuentes contaminantes móviles o fijas por parte de los Estados, provoca que estos tipos de estudios sea una alternativa de carácter tecnológico para disminuir la contaminación atmosférica.

Gustavo Aveiga, Franklin Peñafiel, Sócrates Palacios, Juan Peralta, Emérita Delgado, César Moreira. Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable CDTs, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción. Escuela Superior Politécnica del Litoral, km 30,5 vía Perimetral. Campus Prosperina.

## Introducción

El Estado promueve el uso de tecnologías limpias o de bajo impacto con el medio ambiente. El diésel es uno de los derivados del petróleo utilizado generalmente por el parque automotor de carga pesada. El constante aumento de emisiones de fuentes contaminantes hacia la biosfera, incide sustancialmente sobre los índices de afección en el sistema respiratorio del ser humano. Las semillas de oleaginosas no comestibles, representa un recurso disponible no utilizado a nivel industrial para la obtención de biocombustible en el Ecuador, sin que éste afecte la producción de aceite para consumo humano.

## Objetivos

**General :** Determinar parámetros operacionales físico-químicos de aceite vegetal refinado no comestible de semilla de *Jatropha Curcas* como paso previo para obtención de biodiésel.

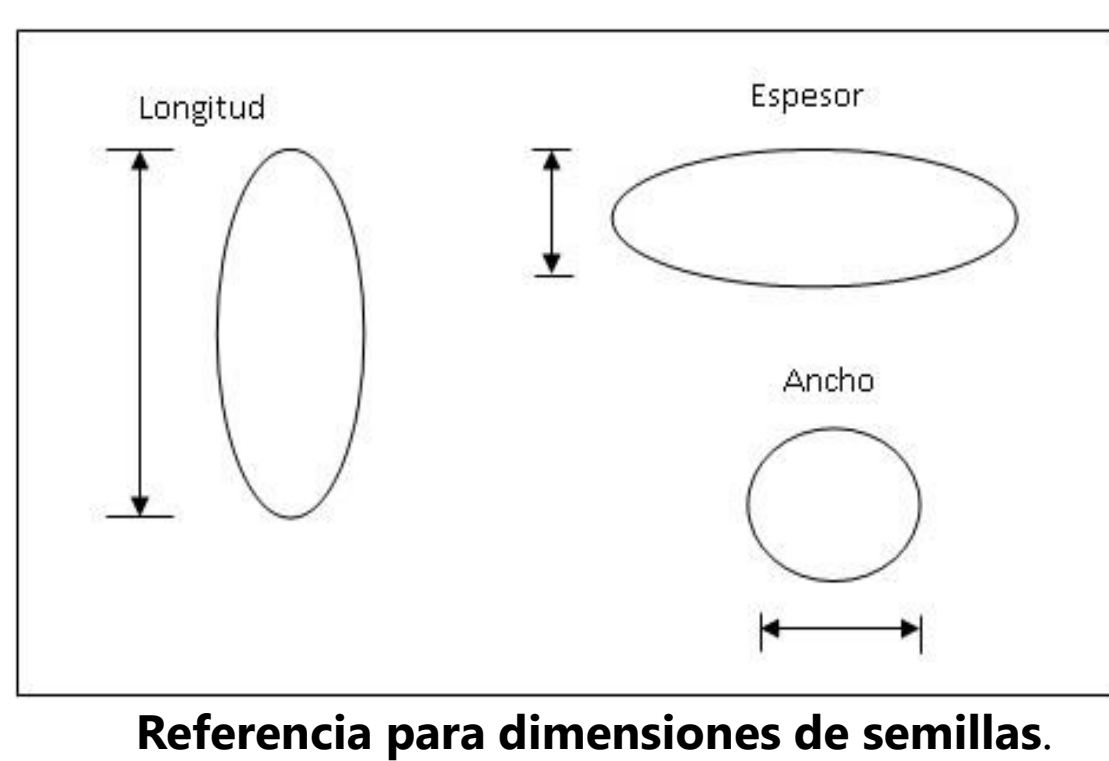
### Específicos

- Caracterizar propiedades morfológicas dimensionales de la semilla de *Jatropha Curcas*.
- Estimar rendimiento de extracción de aceite vegetal crudo de semilla de *Jatropha Curcas*.
- Caracterizar las propiedades físico-químicas del aceite crudo y refinado de semillas de *Jatropha Curcas*.
- Comparar los parámetros físico-químicos del aceite refinado del estudio con el aceite de palma (*Elaeis guineensis*).
- Verificar el cumplimiento de norma de parámetros mínimos del aceite refinado para producción de biodiésel.

## Metodología



Árbol de *Jatropha Curcas*



Referencia para dimensiones de semillas.

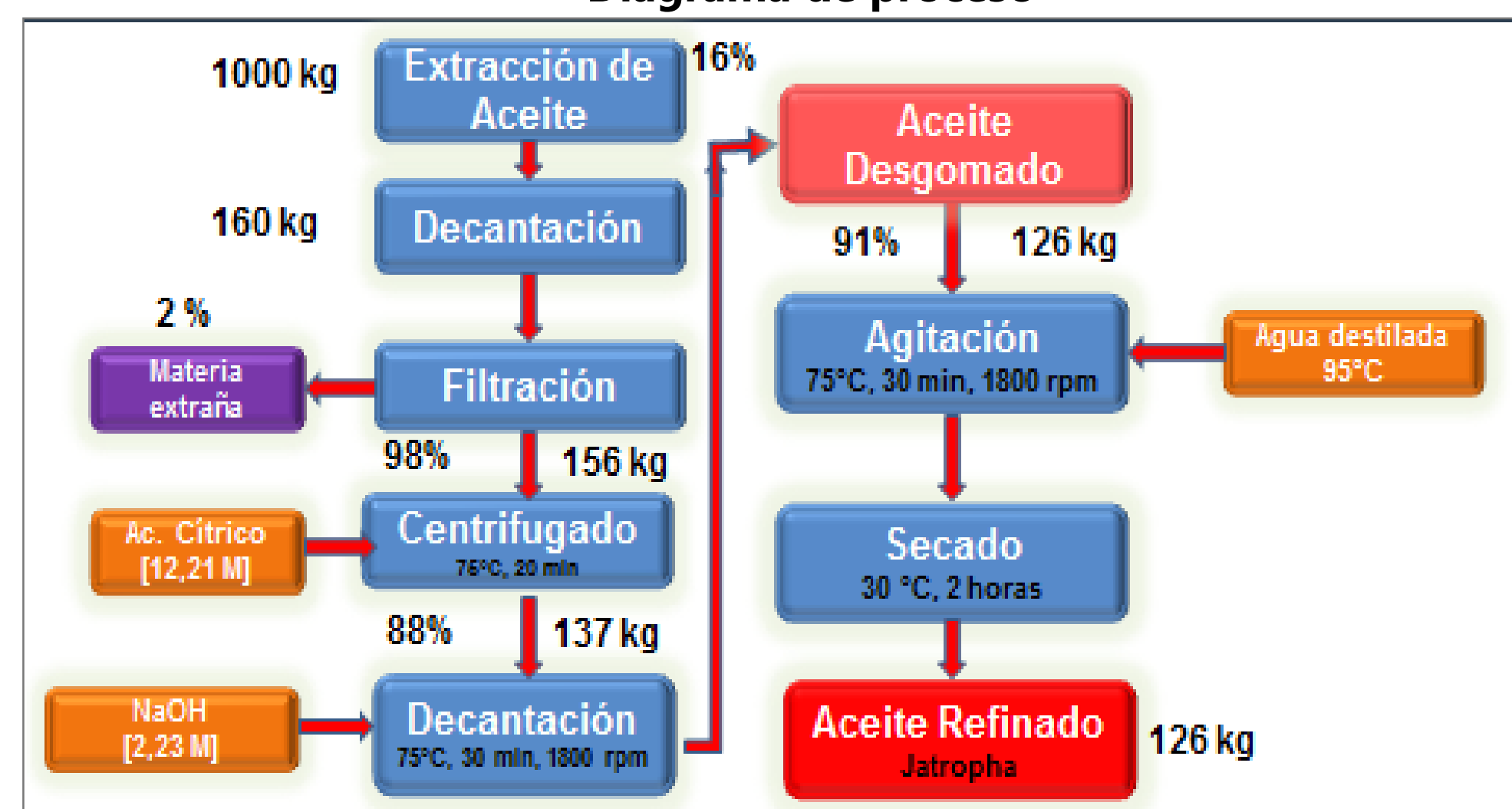
### Datos morfológicos de semillas de *Jatropha Curcas*

Nº Muestra	Semilla de estudio	(Betancur Prisco, Mira Hernández, & París Londoño, 2014)
100	Dimensión (mm), valor	Valor medio
Largo, L (mm)	18.157 ± 0.07	17.80 ± 0.60
Ancho, An (mm)	11.089 ± 0.04	10.80 ± 0.64
Espesor, Es (mm)	8.8247 ± 0.03	8.58 ± 0.71
Propiedad dimensional		
Diámetro aritmético, Da (mm)	12.6903 ± 0.04	12.39 ± 0.45
Diámetro geométrico, Dg (mm)	12.1099 ± 0.04	11.80 ± 0.51
Esféricidad, Ø	66.71 ± 0.001	66.30 ± 3.50
Volumen unitario Vu (cm <sup>3</sup> )	7.4667 ± 0.07	6.92 ± 0.54

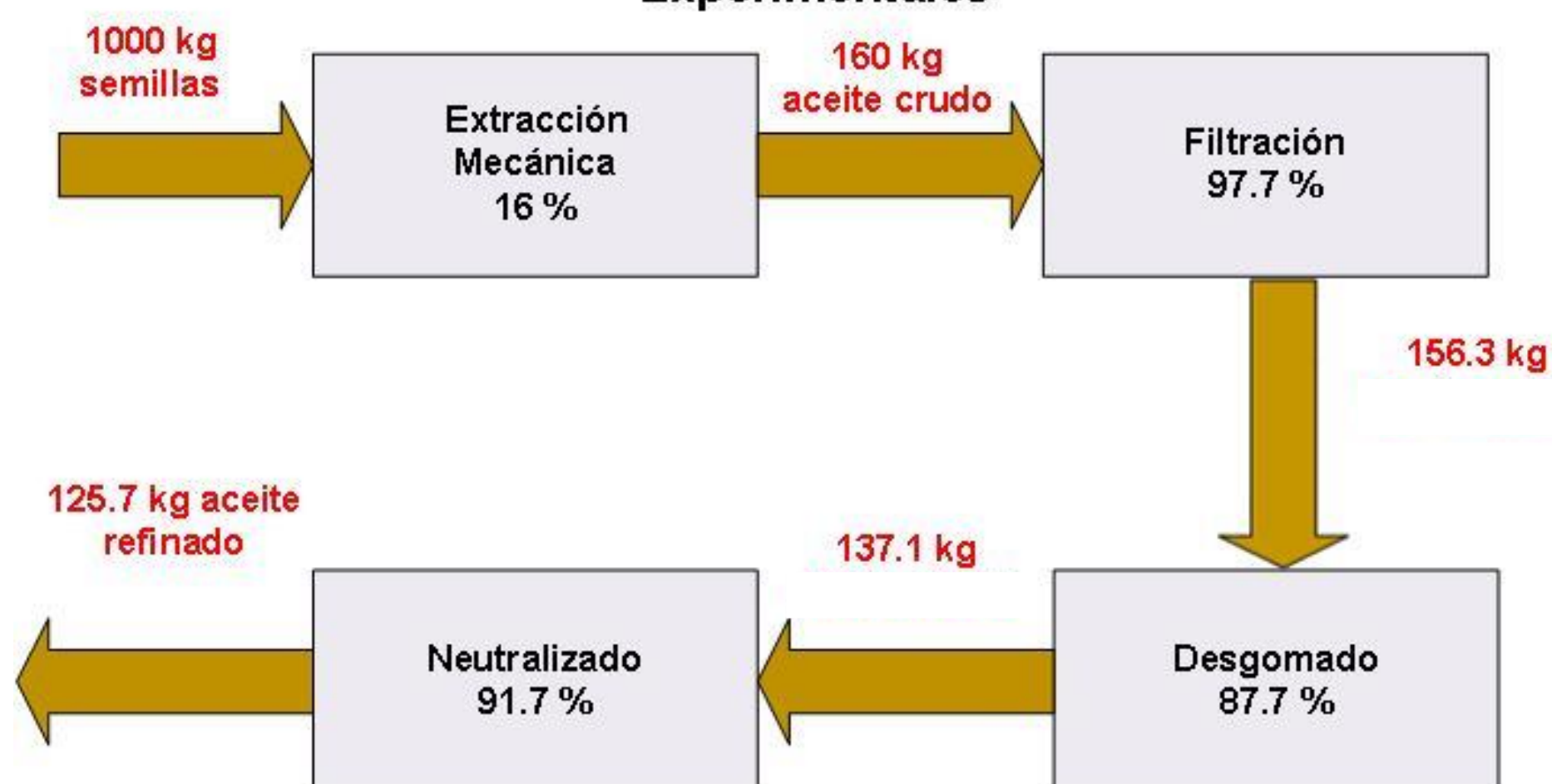
### Aceite crudo / Aceite refinado

Parámetro	Valor <sup>1</sup>	Valor <sup>2</sup>	Valor Aceite crudo de estudio	Valor Aceite refinado de estudio
Densidad, (g/ml)	0.918 ± 0.21	0.917	0.911 ± 0.0	0.914 ± 0.0
Punto de inflamación, (°C)	326.5 ± 6.0	268	295 ± 0.0	300 ± 0.0
Índice de refracción	-	-	1.4695 ± 0.0	1.469 ± 0.0
Índice de yodo (g Yodo / 100 g)	101.0 - 135.90	-	97.42	-
Índice de acidez (mg KOH / g)	1.159 ± 0.016	11.84	4.829 ± 0.066	-
Poder calorífico (J/g)	39 221 ± 33.0	-	38 274.35 ± 32.415	38 051.5 ± 61.5
Punto de fluidez (°C)	-	-5	-5	-9
Viscosidad cinemática (cSt)	-	33.89	36.93	38.15

### Diagrama de proceso



### Diagrama de Bloque, Rendimiento Obtenido por Etapa de Extracción Mecánica y Refinamiento de Aceite en Pruebas Experimentales



## Conclusiones

- Comportamiento morfológico similar con semillas de Colombia, África e India.
- Esféricidad de semilla acorde a contenido de aceite.
- Rendimiento de extracción mecánica fue de 16 g / 100 g de semilla.
- Rendimiento del proceso de refinamiento, 78,49%.
- Rendimiento global del proceso, 12,6%.

## Referencias

- Betancur Prisco, J. C., Mira Hernández, C., & París Londoño, L. S. (2014). *Propiedades físicas y mecánicas de granos de Jatropha Curcas cultivadas en Colombia*. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia(73), 187-199.
- Lafargue Pérez, F., & Barrera Vaillant, N. (2012). *Caracterización físico-química del aceite vegetal de Jatropha Curcas L*. TECNOLOGÍA QUÍMICA, 22(2), 162-165.
- P. Sirisomboona, P. K. (2007). *Physical and mechanical properties of Jatropha curcas L*. Biosystems Engineering, 97, 201-207.
- Shkelqim Karaj, J. M. (2010). *Determination of physical, mechanical and chemical properties of seeds and kernels of Jatropha curcas L*. Industrial Crops and Products, 32, 129-138.
- Yate Segura, A. V. (2013). *Evaluación del proceso de extracción del aceite de Jatropha curcas L. para la producción de biodiésel*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Bogotá.