

**DESARROLLO DE UNA ALTERNATIVA ALIMENTICIA A PARTIR
DE LA SEMILLA DE *Jatropha curcas***

**Alejandra Uribe Ospina
Karen Tatiana Yépez López**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI
2014**

DESARROLLO DE UNA ALTERNATIVA ALIMENTICIA A PARTIR DE LA SEMILLA DE *Jatropha curcas*

Alejandra Uribe Ospina
Karen Tatiana Yépez López

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de
Ingeniera Química

Director
Jaime Restrepo Osorio, Químico Ph. D.

Co directores
Ana Julia Colmenares, Química Ph. D.
Mario Hincapié Silva, Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI
2014

DEDICATORIAS

A mi familia por el apoyo incondicional a lo largo de mi vida, a mis amigos porque siempre tuvieron palabras para fortalecer mi espíritu en los momentos más difíciles y a quienes no escatimaron con su ayuda y sus sonrisas para facilitar el proceso y lograr que este proyecto viera la luz.

Alejandra Uribe Ospina

A Dios por colocarme y guiarme en el camino correcto para alcanzar el culmen en esta etapa de mi vida.

A mi madre por todo su amor, por ser tan incondicional conmigo, por estar allí siempre para darme aliento y confianza para afrontar los retos, por enseñarme y orientarme en cada etapa de mi vida. Por ella soy quien soy ahora.

A mi padre por sus valiosos consejos de vida. Por guiarme para tomar decisiones, por sacrificarse para que yo pudiera cumplir mis sueños y culminar mis proyectos. Por creer siempre en mí y darme todo su apoyo.

A mi compañero de vida Danny por motivarme, por estar siempre listo para brindarme toda su comprensión y acompañarme incondicionalmente en esta etapa de mi vida.

Karen Tatiana Yépez López

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director Jaime Restrepo y codirectores Ana Julia Colmenares y Mario Hincapié por tener fe en nuestro trabajo y visión entregándonos las riendas del proyecto, por apoyarnos y acompañarnos durante el proceso, por comprender nuestras dificultades y tener las palabras para motivarnos en todo momento.

A los miembros del Laboratorio del Grupo de Investigación de Productos Naturales y Alimenticios de la Universidad del Valle (GIPNA) por su incansable ayuda, en especial a Harlen Torres y Dayanna Pantoja.

A los miembros del Laboratorio de Análisis Industriales de la Universidad del Valle por su acompañamiento y sus asesorías que nos ayudaron tanto, en especial a José Caballero y Jenny Ángel.

Al Laboratorio de Espectrometría de la Universidad del Valle, en especial a don Luis por su completa disposición y acompañamiento en las fases en las que fue indispensable su conocimiento y ayuda.

Al Laboratorio de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Valle, en especial a su directora Gloria Lasso porque siempre tuvo tiempo para brindarnos su asesoría y ayudarnos a encontrar soluciones.

A los miembros del Laboratorio de Biología de la Universidad del Valle.

A Emmanuel Román y Natalia Arias por sus consejos, acompañamiento y ayuda.

A la Universidad del Valle por participar en nuestro proceso de formación personal y profesional en los últimos años y durante la realización de este proyecto con disponibilidad completa de las instalaciones y recursos.

TABLA DE CONTENIDO

1.	RESUMEN	11
2.	INTRODUCCIÓN	13
3.	OBJETIVOS.....	15
3.1	Objetivo general	15
3.2	Objetivos específicos	15
4.	MARCO TEÓRICO	16
5.	MATERIALES Y MÉTODOS	29
5.1	Acondicionamiento de la semilla de <i>Jatropha curcas</i>	29
5.2	Extracción de aceite de <i>Jatropha curcas</i>	30
5.3	Molienda de la torta de <i>Jatropha curcas</i>	32
5.4	Análisis proximal de <i>Jatropha curcas</i>	32
5.5	Caracterización del aceite de <i>Jatropha curcas</i>	33
5.6	Estudio de estabilización de la harina de <i>Jatropha curcas</i>	33
5.7	Estudio de detoxificación de la torta de <i>Jatropha curcas</i>	34
5.8	Producción de biodiesel a partir de aceite de <i>Jatropha curcas</i>	37
6.	6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
6.1	Acondicionamiento de las semillas	40
6.2	Análisis proximal de núcleo de semilla de <i>Jatropha curcas</i> tóxica	41
6.3	Análisis proximal de núcleo de semilla de <i>Jatropha curcas</i> no tóxica	41
6.4	Extracción de aceite de <i>Jatropha curcas</i>	42
6.5	Molienda de la torta de <i>Jatropha curcas</i> no tóxica	46
6.6	Análisis proximal de la torta de <i>Jatropha curcas</i>	47
6.7	Caracterización del aceite de <i>Jatropha curcas</i>	49

6.8	Estudio de estabilización.....	53
6.9	Estudio de detoxificación de la torta de <i>Jatropha curcas</i>	54
6.10	Características del producto final.....	59
6.11	Variación de características de <i>Jatropha curcas</i> durante el estudio.	61
6.12	Producción de biodiesel a partir de aceite de <i>Jatropha curcas</i>	62
6.13	Descripción de proceso para el aprovechamiento integral de la semilla <i>Jatropha curcas</i>	63
6.14	Uso potencial de harina de <i>Jatropha curcas</i> para alimento de animales...	66
7.	CONCLUSIONES	68
8.	RECOMENDACIONES	70
9.	BIBLIOGRAFÍA	71

TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación Taxonómica de la <i>Jatropha curcas</i>	18
Tabla 2. Variables de rendimiento del cultivo de <i>Jatropha curcas</i>	19
Tabla 3. Reactivos, Materiales y equipos usados para acondicionamiento de semilla <i>Jatropha curcas</i> y extracción de JcO	29
Tabla 4. Condiciones de operación durante extracción de JcO para diseño experimental.....	31
Tabla 5. Condiciones de ensayos para extracción de JcO.....	31
Tabla 6. Materiales y equipos usados para molienda de torta de Jc.....	32
Tabla 7. Juego de tamices usados.....	32
Tabla 8. Reactivos, materiales y equipos usados para estudio de estabilización de harina de Jc.....	33
Tabla 9. Tratamientos realizados a las tortas de semilla de Jc	35
Tabla 10. Reactivos usados durante pretratamiento ácido para la producción de biodiesel	37
Tabla 11. Condiciones de operación de esterificación catálisis ácida	37
Tabla 12. Reactivos usados durante la transesterificación para la producción de biodiesel a partir de JcO.....	38
Tabla 13. Condiciones de operación de la transesterificación del JcO para la producción de biodiesel.....	38
Tabla 14. Condiciones implementadas en el método de GC/MS	39
Tabla 15. Resultados y rendimientos de descascarado de las semillas de <i>Jatropha curcas</i> para la variedad tóxica y no tóxica.....	40
Tabla 16. Análisis proximal de núcleo de semilla de Jc tóxica	41
Tabla 17. Análisis proximal de núcleo de semilla de Jc no tóxica	41
Tabla 18. Aceite extraído y eficiencia de extracción de JcO según diseño experimental.....	42
Tabla 19. Mejores resultados para extracción de JcO	43
Tabla 20. Análisis de varianza para eficiencia de extracción	44
Tabla 21. Análisis granulométrico para cada cuchilla utilizada.....	46
Tabla 22. Análisis proximal torta de Jc tóxica.....	48

Tabla 23. Análisis proximal de torta de Jc no tóxica.....	48
Tabla 24. Distribución de ácidos grasos identificados por cromatografía de gases en JcO.....	49
Tabla 25. Perfil de ácidos grasos identificados por cromatografía de gases en JcO	50
Tabla 26. Características físico-químicas del JcO.....	51
Tabla 27. Reporte de ácidos grasos libres para el tiempo de exposición al vapor: 5 minutos.....	53
Tabla 28. Reporte de ácidos grasos libres para el tiempo de exposición al vapor: 10 minutos.....	53
Tabla 29. Reporte de ácidos grasos libres para el tiempo de exposición al vapor: 15 minutos.....	53
Tabla 30. Pérdidas de masa de torta de <i>Jatropha curcas</i> durante tratamientos independientes de detoxificación	54
Tabla 31. UV's comparativos para el pico analizado en los cromatogramas de HPLC para la detección de los ésteres de forbol en semilla de <i>Jatropha curcas</i> ..	55
Tabla 32. Cromatogramas (HPLC) comparativos para método implementado en la detección de ésteres de forbol en semilla de <i>Jatropha curcas</i>	56
Tabla 33. Resultados de HPLC para los diferentes tratamientos de la harina de <i>Jatropha curcas</i> tóxica	57
Tabla 34. Resultados de HPLC la harina de <i>Jatropha curcas</i> no tóxica.....	57
Tabla 35. Análisis proximal de harina de Jc con tratamiento de detoxificación	59
Tabla 36. Contenido de proteína en alimentos seleccionados	60
Tabla 37. Metil ésteres identificados con mayor presencia en biodiesel de JcO por espectrometría de masas adaptada a cromatografía de gases.....	62
Tabla 38. Proteína bruta requerida en alimentación diaria de varios animales.	67

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución global de <i>Jatropha curcas</i>	17
Figura 2. Diferentes usos de la <i>Jatropha curcas</i>	21
Figura 3. Factores de ésteres de forbol identificados en aceite de <i>Jatropha curcas</i> (Haas et al ,2002).....	23
Figura 4. Eficiencia de extracción de JcO. Diagrama de Pareto estándar.	45
Figura 5. Eficiencia de extracción de JcO. Diagrama de efectos.	45
Figura 6. Análisis granulométrico acumulado para torta de Jc no tóxica para dos cuchillas.....	47
Figura 7. Análisis de estabilidad de harina de <i>Jatropha curcas</i> no tóxica para cada tiempo de exposición al vapor en autoclave.....	53
Figura 8. Cromatograma (HPLC) de la harina de <i>Jatropha curcas</i> tóxica a 280nm	57
Figura 9. Cromatograma (HPLC) de la harina de <i>Jatropha curcas</i> tóxica con mejor tratamiento 4 TTOE a 280nm	57
Figura 10. Cromatograma (HPLC) de la harina de <i>Jatropha curcas</i> no tóxica a 280nm	58
Figura 11. Comparación entre tratamientos de detoxificación de harinas de <i>Jatropha curcas</i> tóxica y no tóxica	59
Figura 12. Compilado de análisis proximales realizados en distintas fases del proceso a ambas variedades de semilla de <i>Jatropha curcas</i>	61
Figura 13. Cromatograma de metil ésteres presentes en biodiesel de JcO	62
Figura 14. Diagrama de Bloques para el pretratamiento de la semilla de <i>Jatropha curcas</i> y la obtención de aceite y torta	64
Figura 15. Diagrama de Bloques para la obtención de harina de <i>Jatropha curcas</i> detoxificada y estabilizada.	65
Figura 16. Diagrama de bloques para la obtención de biodiesel y glicerina de <i>Jatropha curcas</i>	66

ABREVIATURAS

EST	Estabilización
g	Gramos
GC	Cromatografía de gases
GL	Grados de libertad
Ha	Hectárea
HPLC	La Cromatografía líquida de alta eficacia o High performance liquid chromatography
Jc	<i>Jatropha curcas</i>
JcO	Aceite de <i>Jatropha curcas</i>
kg	Kilogramos
KPa	Kilopascales
l	Litro
mAU	Unidades de miliabsorbancia
mg	Miligramos
min	Minutos
ml	Mililitros
MS	Espectrometría de masas
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar
N	Normalidad
No.	Número
Ref.	Referencia
Rpm	Revoluciones por minuto
T	Tonelada
TTO	Tratamiento
TTONT	Tratamiento en <i>Jatropha curcas</i> no tóxica
TTOE	Tratamiento químico con etanol
TTOTE	Tratamiento térmico
UV	Ultravioleta
v	Volumen
Vis	Visible
w	Peso
μm	Micrómetros
°C	Grados Celsius
%	Porcentaje
\$	Pesos colombianos

1. RESUMEN

La *Jatropha curcas* es un árbol pequeño multipropósito resistente a las sequías. Sus semillas son ricas en aceite y la torta del núcleo de *Jatropha* obtenido tras la extracción del aceite es rica en proteína. Con el fin de desarrollar una alternativa alimenticia a partir de la torta resultante de la extracción del aceite de las semillas de *Jatropha curcas*, se realizó un estudio centrado principalmente en el procedimiento para la obtención de la harina de *Jatropha curcas* considerando todos los procesos adjuntos: se planteó un pretratamiento para la utilización de núcleos de semilla, se llevó a cabo la extracción de aceite con prensa hidráulica, se caracterizó el aceite, se estudió la estabilización de los ácidos grasos libres en la torta residual al someterla a vapor en autoclave variando el tiempo de exposición y se le hizo seguimiento por 23 días, encontrando que el mejor tiempo para estabilizar los ácidos grasos presentes fue 10 minutos a 121°C. La semilla de *Jatropha curcas* contiene una sustancia tóxica llamada ésteres de forbol, por lo tanto fue necesario realizar un procedimiento de detoxificación a la harina obtenida. Se caracterizó los núcleos de semilla en diferentes fases del proceso por análisis proximal, se estudió la implementación del método de detoxificación química con etanol combinado con tratamiento térmico con el cual se alcanzó una disminución del 83% de ésteres de forbol respecto a su contenido inicial, se analizaron dos variedades de semilla con niveles diferentes de ésteres de forbol, encontrando que la considerada no tóxica presentó 37% de ésteres de forbol con respecto a la considerada tóxica. La presencia de este compuesto se realizó por HPLC. La harina tratada con un 20% de proteína bruta, se presenta como una alternativa potencial en alimentación para varios animales, a los que se les puede suministrar una cantidad de harina de *Jatropha curcas* procesada en menor proporción comparado con el alimento típico sin alterar el contenido de proteína bruta en la dieta. Con el aceite obtenido, se hizo biodiesel con una concentración de 97,9% de ésteres metílicos y un rendimiento de 68,6% w/w respecto al aceite inicial.

Palabras clave: *Jatropha curcas*, ésteres de forbol, detoxificación, estabilización, alimento, biodiesel.

ABSTRACT

Jatropha curcas is a multipurpose and drought-resistant small tree. Its seeds are rich in oil, and the *Jatropha* kernel meal obtained after oil extraction is rich in protein. In order to develop a nourishing alternative from the resultant cake of the extraction of the oil of the seeds of *Jatropha curcas*, it was realized a study centred principally on the procedure for the obtaining of the flour of *Jatropha curcas* considering all the attached processes: it raised a pretreatment for the utilization of nuclei of seed, the extraction of oil was carried out with hydraulic press, the oil was characterized, it studied the stabilization of the oily free acids in the residual cake when it is subjected to steam in autoclave by varying the time of exhibition and follow-up was done for 23 days, it found that the best time was 10 minutes to 121°C, the cores of seed were characterized in different phases of the process by analysis proximal, it studied the implementation of the method of chemical detoxification with ethanol combined with thermal treatment with which to reached a decrease of 83% of phorbol esters with regard to its initial content, two varieties of seed with varying levels of phorbol esters were analyzed, finding that considered nontoxic presented 37% of phorbol esters regarding considered toxic. The presence of this compound was realized by HPLC. Flour treated with 20% crude protein, appears as a potential alternative feed for various animals, which may be supplied with a quantity of flour processed *Jatropha curcas* less than the typical amount of food without affecting the content of crude protein in the diet. With the oil obtained was done biodiesel with a concentration of 97,9 % of methyl esters and a performance of 68,6% w/w with regard to initial oil.

Keywords: *Jatropha curcas*, phorbol esters, detoxification, stabilization food, biodiesel.

2. INTRODUCCIÓN

La *Jatropha curcas* es una planta Euphorbiacea originaria de América Central, con gran tolerancia a los climas drásticos y suelos de baja productividad, ofrece como fruto una semilla oleaginosa con un alto contenido de aceite que se utiliza actualmente a nivel mundial para la producción de biodiesel. Para el 2008 se estimaba que en el mundo había 936.000 Ha cultivadas con *Jatropha curcas* de las cuales 85% estaban en Asia, 13% en África y 2% en América Latina. Se estima que para el 2015 haya 12'800.000 Ha cultivadas con *Jatropha*. (WWF, 2008)

De 1 T (1098,9 l) de aceite extraída, queda como residuo 1,8 T de torta con alto contenido de proteína. Dadas las características, su uso se presenta como alternativa para la generación de un producto alimenticio a partir de los residuos sólidos del proceso de extracción de aceite de la semilla *Jatropha curcas*.

Esta investigación se realizó en el marco del proyecto “Aprovechamiento de dos especies vegetales con potencial agroindustrial, como posibles reemplazos de cultivos ilícitos en los Departamentos del Valle y Cauca (Colombia)” para buscar una reactivación económica de las comunidades campesinas, afro-descendientes e indígenas de la región.

En este documento se describen los procedimientos implementados para el pretratamiento de la semilla, la extracción de aceite, su caracterización y la de las tortas obtenidas del núcleo de semilla o almendra sin cubierta, además de la detoxificación y estabilización de las mismas y se plantea un método para la producción de biodiesel a partir de la semilla *Jatropha curcas*, obteniendo que:

- La mayor eficiencia de extracción de aceite por medio de prensa hidráulica se presentó para la semilla molida y precalentada a 60°C, alcanzando una extracción de 63% en peso respecto al aceite contenido en el núcleo de la

semilla de *Jatropha curcas*. El aceite obtenido de las dos variedades estudiadas, fue caracterizado.

- El aceite contenido en los residuos sólidos de la extracción de aceite puede sufrir hidrólisis por lipasas, promoviendo la formación de ácidos grasos libres que deterioran aceleradamente la torta, por lo que se analizó el efecto de la exposición de la misma a calor húmedo para la inactivación de las lipasas, encontrando que luego de 23 días de realizado el procedimiento durante 10 minutos en autoclave a 121°C, se redujo el 33% de los ácidos grasos libres y limitó el aumento de los mismos.
- Dado que la semilla de *Jatropha curcas* presenta niveles de toxicidad causados principalmente por el contenido de ésteres de forbol, se analiza el método de detoxificación química con etanol, alcanzando una disminución del 83% con respecto al contenido inicial. Además, se analizaron dos tortas con niveles diferentes de ésteres de forbol, encontrando que la considerada no tóxica presentó 37% de contenido de ésteres de forbol.
- La harina de *Jatropha curcas* procesada se considera como una alternativa alimenticia para peces con bajo requerimiento proteico en su dieta, vacas para carne, cerdos y pollos suministrando una cantidad de harina de *Jatropha curcas* procesada menor que la cantidad de alimento típico sin alterar el contenido total de proteína bruta en la dieta.
- El biodiesel producido a partir del aceite de *Jatropha curcas* implementando un procedimiento de esterificación ácida seguido de transesterificación básica, presentó un contenido de metil ésteres de 97,9% y un 68,6% de rendimiento en peso con respecto al aceite inicial.
- De 10kg de semilla de *Jatropha curcas* tratada se obtienen 2,3kg de cáscara de semilla, 3,7kg de harina procesada, 1,7kg de biodiesel y 0,7kg de glicerina.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Desarrollar una alternativa alimenticia de la torta resultante de la extracción del aceite de las semillas de *Jatropha curcas*.

3.2 Objetivos específicos

- Plantear un método de pretratamiento de la materia prima para que el producto final cumpla con los parámetros de calidad en su nivel nutricional y tiempo de vida útil.
- Identificar las características de la torta de la semilla de *Jatropha curcas* (materia prima) después del pretratamiento.
- Determinar y analizar los usos alimenticios que se le puede dar a la torta de la semilla de *Jatropha curcas*.
- Describir el proceso para la obtención de un producto alimenticio a partir de la torta de la semilla de *Jatropha curcas*.

4. MARCO TEÓRICO

La planta *Jatropha curcas* ha sido considerada como la planta maravilla (Wakandigara et al, 2013). Es autóctona de casi todos los países tropicales y es una candidata adecuada para:

- Producir bioaceite para combustibles de vehículos.
- Volver a cultivar los suelos erosionados y mejora de la fertilidad.
- Fomentar el uso de aceite vegetal como una opción viable de energía alternativa renovable para cocinar, usos para iluminación y calefacción reduciendo consumo de leña y residuos. Además de gastos para combustibles usados para motores fijos y móviles para bombeo de agua, molienda de granos, transporte y generación eléctrica
- El establecimiento de las cadenas tecnológicas descentralizadas basadas en el uso de aceite vegetal. (Sotolongo, 2002)

La creciente popularidad de la *Jatropha curcas* se deriva de los conocimientos generales existentes de ser un árbol oleaginoso, que crece sin competir con los cultivos anuales de alimentos, llenando así un nicho ecológico (Soerawidjaja, 2010)

El nombre del género *Jatropha* deriva del griego iatros (doctor) y trophé (comida) lo que implica usos medicinales (Heller, 1996). Esta planta es una oleaginosa de porte arbustivo, tiene más de 3.500 especies agrupadas en 210 géneros. (Torres, 2007). El género *Jatropha* es originario de América tropical, con los restos más antiguos que se encuentran por EW Berry (1929) en las formaciones geológicas de Perú a la temprana edad terciaria (Quimbayo, 2010). La planta se encuentra ampliamente distribuida en medios silvestres y semicultivos en Centro y Sur América, Sur y Este de Asia y África (Aregheore, et al. 2004)

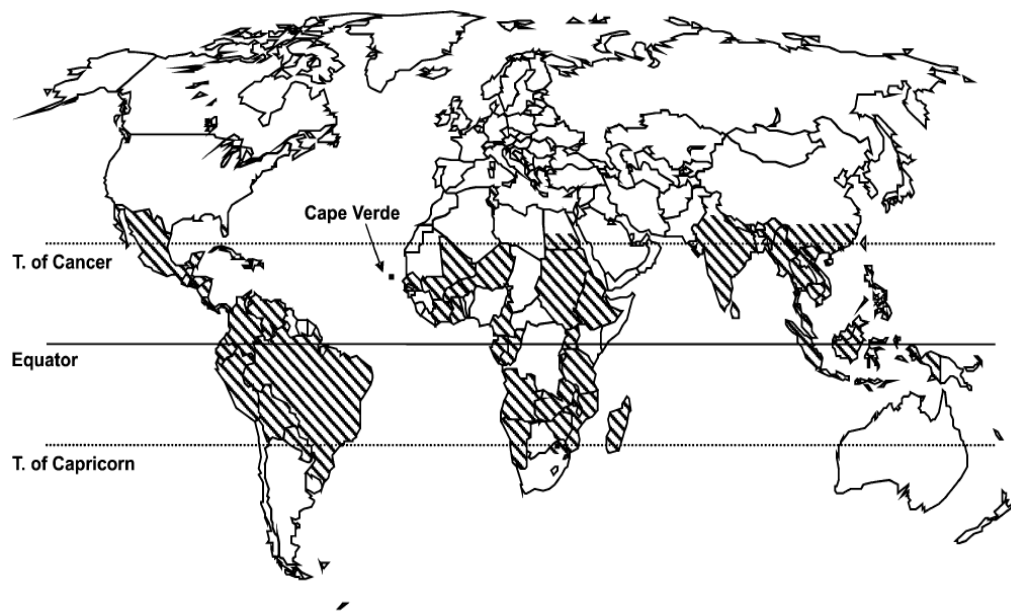


Figura 1. Distribución global de *Jatropha curcas*.

Regiones sombreadas indican presencia de *Jatropha curcas*. (Heller, 1996)

El género *Jatropha* fue determinado por el botánico sueco Carl Linneo quien la describió por primera vez (1753-1754). Cronquist en 1981, estableció la clasificación taxonómica del Piñón (*Jatropha curcas*) es la siguiente: (FAO, 2010)

Tabla 1. Clasificación Taxonómica de la *Jatropha curcas*

Reino	Planta
Subreino	Tracheobionta
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Rosidae
Orden	Euphorbiales
Familia	Euphorbiaceae
Subfamilia	Crotonoideae
Tribu	Jatropheae
Género	<i>Jatropha</i>
Especie	<i>curcas</i> L.

La planta *Jatropha curcas* no es pastada por animales y crece en suelos pobres en condiciones climáticas extremas. El árbol de la semilla oleaginosa requiere bajos insumos de agua y sobrevive a altas temperaturas y períodos largos de sequía (jatrosolutions.com, 2013). Es una planta muy resistente a plagas y enfermedades y se adapta prácticamente a cualquier tipo de terreno, su productividad comienza a ser estable después del primer año, por lo general cuando los árboles son de 2-4 años de edad. La producción económica de las plantas de *Jatropha* se extiende desde el primer año después de la siembra hasta 50 años después. En algunos casos, este arbusto puede llegar a vivir hasta 100 años. Sin embargo, no está adaptada para crecer bajo la sombra del bosque y no compite con especies de crecimiento rápido de la selva tropical. A pesar de poder resistir a condiciones ambientales adversas, se conoce que para el nivel alto de producción de aceites, necesita por lo menos 45 cm de suelos profundos, una cantidad adecuada de nitrato, fosfato y potasio (NPK), para tener un buen crecimiento y maduración del fruto (Quimbayo, 2010).

Tabla 2. Variables de rendimiento del cultivo de *Jatropha curcas*

Variable	Dato	Referencia
Adaptación	0-800 m.s.n.m	Colbio, 2012
Semilla para siembra por hectárea	4 kg	
Número de granos promedio contenido en un kilo de semilla	1000-2370	
Distancia y densidad de siembra	2,45 m * 2,45 m	
Número de plantas/hectárea	1666	
Inicio etapa de productividad óptima	18 meses después de la siembra.	
Producción de frutos	5 toneladas/ha/año	Quimbayo, 2010
Aceite por hectárea de <i>Jatropha</i> cultivada a partir del segundo año	1900 litros	
Torta de semilla	1 t/ha/año	
Precio tonelada grano de variedad tóxica para extracción	\$800.000	Colbio, Colombia 2014
Precio tonelada grano de variedad no tóxica para extracción	\$1'000.000	
Precio tonelada aceite refinado	\$1.600.000	

Después de 18 meses de la siembra, el árbol de *Jatropha curcas* produce 5 ton/ha/año de frutos, por cada hectárea es posible extraer 1900 litros de aceite y 1 tonelada de torta de semilla(ver tabla 2).

Un argumento para el cultivo de oleaginosas con fines energéticos es la creciente relación entre calentamiento y efecto invernadero. Cuando se queman estos combustibles, la atmósfera no es contaminada por el dióxido de carbono, ya que éste ya ha sido asimilado durante el crecimiento de estos cultivos. El balance de CO₂, por lo tanto, se mantiene estable (Heller, 1996).

Otro argumento que ratifica los beneficios que se obtienen de este cultivo en los sistemas agroforestales, es el de aprovechamiento del terreno, encontrándose que la *Jatropha* puede ser sembrada en una hectárea lineal (usada como cerca viva

de cultivos principales) dando el mismo rendimiento que si fuera sembrada en una hectárea total (monocultivos convencionales), este eficiente modo de cultivo, es el más utilizado en los países africanos que tienen cultivos de *Jatropha*, logrando ventajas económicas brindadas por dos cultivos rentables, además de los beneficios brindados por la *Jatropha* al proteger el cultivo principal de animales y actuar como fertilizante (Quimbayo, 2010)

Además de ser una fuente de aceite, la *Jatropha* también proporciona un alimento que sirve como un suplemento de proteínas de alto valor nutritivo en la alimentación animal, si se eliminan las toxinas (Becker & Makkar, 1998). A pesar de esto, es una especie en proceso de domesticación, lo cual representa un desafío técnico al momento de establecer cultivos comerciales de gran extensión (Palacio, 2012). Este cultivo no debe verse como un sustituto de cultivos alimenticios o industriales; la *Jatropha curcas* o piñón como también se le conoce, debe considerarse como un cultivo alternativo que puede generar importantes ingresos a la familia rural (Quimbayo, 2010).

La torta de semilla de *Jatropha* contiene alta proteína pura, alta energía y baja fibra. El valor nutritivo de la harina de *Jatropha* se compara favorablemente con las harinas convencionales de semillas, tales como haba de soja (Makkar et al, 1998). Los niveles de los aminoácidos esenciales (excepto lisina), son más altos en la torta de semillas de *Jatropha* que en la proteína de referencia de la FAO para un niño en crecimiento de 3-5 años.

Aunque actualmente el aceite es más costoso que la harina, ésta es potencialmente un bien valioso. La capacidad de utilizar *Jatropha curcas* como alimento animal no sólo mejora la economía de su producción, sino que también significa que el cultivo produciría tanto el combustible como el alimento. Aunque las semillas contiene una serie de toxinas y antinutrientes, esta toxicidad se ha atribuido

especialmente a la presencia de una proteína (curcina) y (diterpenoides) ésteres de forbol. (King et al, 2009)

Hay muchos otros usos de *Jatropha curcas*, como se muestra en la figura 2. El aceite de la semilla puede ser utilizado como un combustible para la iluminación y es una materia prima para la fabricación de jabón de alta calidad. El residuo del prensado de la semilla es un buen fertilizante orgánico. Todas las partes de *Jatropha curcas* (semillas, hojas y la corteza) se han usado en la medicina tradicional y para los propósitos veterinarios durante mucho tiempo. Esto es típico de la mayoría de los miembros de la familia Euphorbiaceae, cuyas propiedades medicinales puede ser debido a factores de estrés como la sequía y las temperaturas extremas que inducen la síntesis de la supervivencia y la defensa de los productos químicos (Wakandigara et al, 2013).

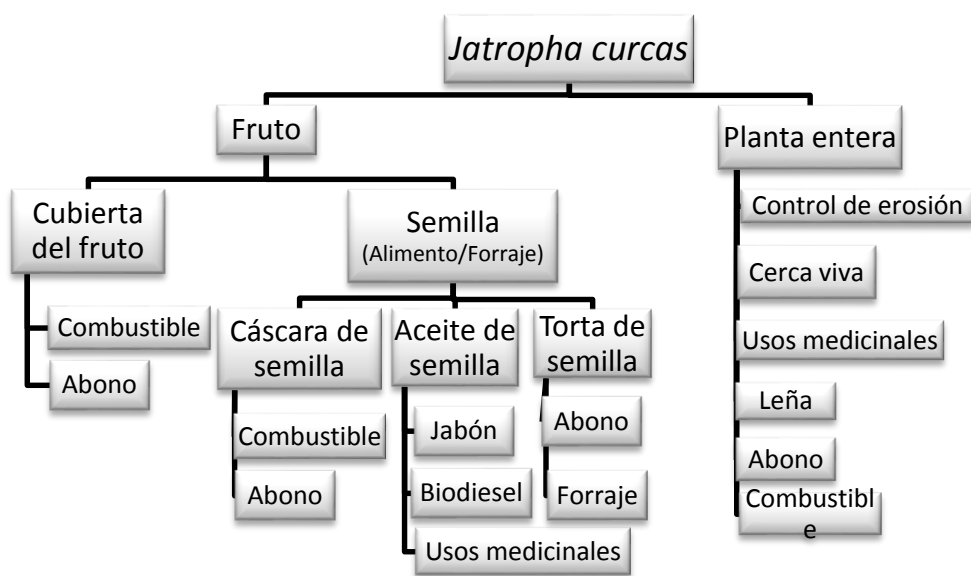


Figura 2. Diferentes usos de la *Jatropha curcas*¹

¹ (Modificado de Heller, 1996)

Cantidades considerables de semillas de *Jatropha* fueron producidas en Cabo Verde, África durante la primera mitad del siglo XIX, y esto constituía una importante contribución a la economía del país. Las semillas se exportaban a Lisboa y Marsella para la extracción de aceite y la producción de jabón. Sin embargo, la producción mundial a finales del siglo XX fue insignificante. (Heller, 1996)

Estudios previos han informado que la planta presenta actividades bioactivas para la fiebre, infecciones de la boca, la ictericia y el reumatismo articular, mientras que investigaciones posteriores trataron de la actividad antiparasitaria de la trituración de hojas en la savia de *Jatropha curcas*, el extracto de agua de las ramas también inhibió fuertemente el efecto citopático de VIH inducido con baja citotoxicidad, así mismo se estudió la actividad de los taninos y se encontró que presentan actividad contra el cáncer y por lo tanto pueden ser utilizados en su prevención, lo que sugiere que *Jatropha* tiene potencial como una fuente de moléculas bioactivas importantes para el tratamiento y la prevención de cáncer (Igbinosa et al, 2009). Aunque se sabe que las especies del género *Jatropha* son tóxicas debido a la presencia de ésteres de forbol, los extractos de estas especies se han utilizado para inhibir del crecimiento de tumores por cáncer (Matsuse et al. 1999).

Los científicos han centrado su atención en la detoxificación de semillas de *Jatropha curcas* y se han estudiado un gran número de métodos. Aunque los métodos de detoxificación física, microbiológica y enzimáticas se han adelantado, se cree que por lo general no son rentables y que las técnicas de detoxificación química pueden ser mucho más rápidas y más baratas. Los mecanismos de la degradación de forbol-éster en semillas de *Jatropha curcas* tampoco se han estudiado (Wakandigara et al, 2013).

Los esteroides de forbol son diterpenos, sustancias tóxicas en las semillas de *Jatropha*, según su concentración en las semillas éstas son consideradas como

tóxicas o no tóxicas, son inductores de la formación de tumores y respuesta inflamatoria. Activan la proteína quinasa C, una enzima clave de transducción de señales lanzado en respuesta a varias hormonas y procesos de desarrollo en la mayoría de células y tejidos. (Megumi et al, 2013) Estudios demuestran que los esteres de forbol no pueden ser destruidos con tratamientos de calor, debido a su estabilidad térmica, pueden soportar 160°C por 30 min (Aregheore, 2004), debido a que lo ésteres de forbol son solubles en grasa, gran parte de estos tienden a ser extraídos junto el aceite. (Belém et al, 2009)

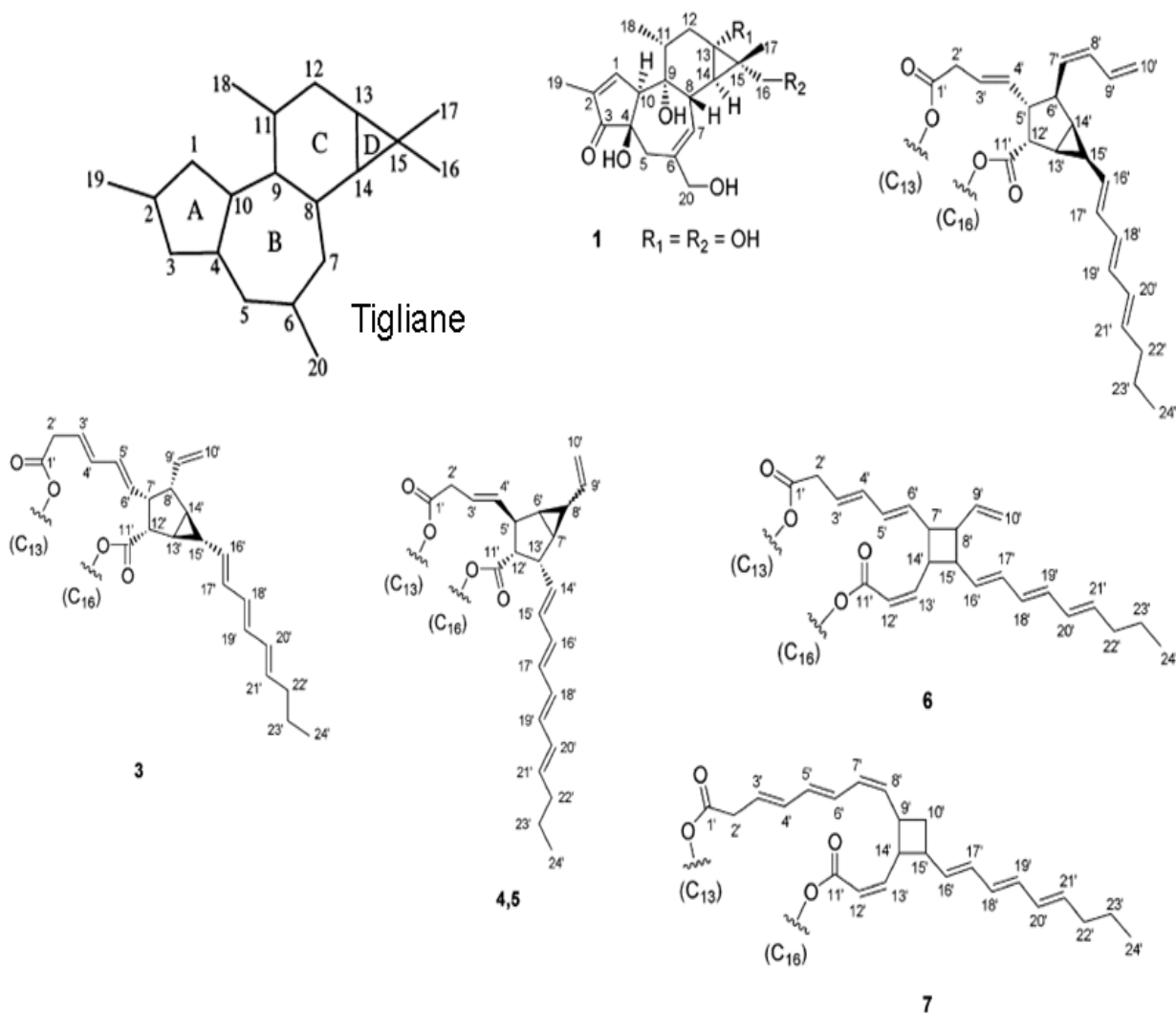


Figura 3. Factores de ésteres de forbol identificados en aceite de *Jatropha curcas* (Haas et al ,2002)

Han sido caracterizados seis diferentes tipos de ésteres de forbol, cuyas configuraciones se muestran en la figura 3. Todos ellos con esqueleto básico de tigliane con cuatro anillos, la hidroxilación de esta estructura en diferentes posiciones y la unión de ésteres de varios grupos de ácidos resultan en la formación de los ésteres de forbol (Goel et al. 2007).

Los ésteres de forbol presentes en las variedades tóxicas, se utilizan como bioinsecticidas en contra de ciertas plagas del sorgo y maíz en países de África (Quimbayo, 2010)

La curcina presente en la semilla de *Jatropha curcas*, es una proteína con acción similar a la ricina de semillas de ricino, mostrando el efecto in vitro la inhibición de la síntesis de proteínas. La curcina, es 1,000 veces menos tóxico que la ricina. Sin embargo, a diferencia de ésta, que es un tipo de RIP (proteínas que inactivan los ribosomas), la acción tóxica de la curcina se asocia con su ingesta, actuando inicialmente sobre la inhibición de la síntesis de proteínas. La ingestión puede ocurrir ya sea por vía oral o nasal. Las semillas de origen mexicano caracterizados como "no tóxico", porque no tienen ésteres de forbol o su contenido es bajo, pero existe la presencia de curcina en concentraciones normales para granos. Hay informes que reportan que las personas de México se alimentan a sí mismos y a sus animales con el grano después de ser tostado al fuego, un proceso que puede desnaturalizar la curcina (Belém et al, 2009).

Cuando se busca la detoxificación, se debe saber que la prevención y eliminación de la toxicidad producida por toxinas de origen químico o natural, implica el conocimiento de cuáles son las de mayor incidencia, de su estructura y de la capacidad reactiva con otras moléculas que permitan su transformación en otras estructuras no tóxicas o que puedan interferir con otros procesos metabólicos. (Haas, 2000)

La FAO en el 2010, estableció una serie de criterios para determinar si el proceso de descontaminación es apropiado o no; dentro de estos se deben tener en cuenta

- Destruir, inactivar o eliminar la toxina.
- No producir residuos tóxicos o carcinogénicos en productos finales o alimentos obtenidos a partir de animales que se alimentaron de una dieta detoxificada.
- Mantener el valor nutritivo y la aceptabilidad del producto.
- No alterar las propiedades tecnológicas importantes de forma significativa.

La desintoxicación y la reutilización de esta torta de semilla es muy importante para agregar valor económico a la utilización de los cultivos, y también reducir el daño potencial al ambiente causado por la eliminación inadecuada de este subproducto. Algunos estudios han utilizado tratamientos físicos y químicos para desintoxicar las semillas de *Jatropha*. Estos métodos han sido eficaces, pero requieren el uso de productos químicos que pueden resultar la presencia de otros residuos tóxicos o alteran las características importantes de la torta (Megumi et al, 2013).

Aregheore et al, 2004 encontraron una disminución del contenido de ésteres de forbol del 94,9% para semilla de *Jatropha curcas* desgrasada sometida a cuatro lavados de metanol al 92% y 92,7%, para la misma semilla tratada con soluciones de NaOH y NaOCl y posteriormente llevada a la autoclave por 30 min a 121°C lavada tres veces con agua destilada y finalmente molida. Martínez-Herrera et al 2006, alcanzaron una disminución del 95,8% del contenido de ésteres de forbol en semilla de *Jatropha* desgrasada tratada con extracción con etanol por dos horas a temperatura ambiente en constante agitación con una relación semilla a solvente 1:10 (w:v), luego filtrada y liofilizada y 97,9% de reducción para la semilla tratada previamente con etanol y luego secada a temperatura ambiente y mezclada con una

solución de NaHCO_3 , llevada a la autoclave por 20 minutos a 121°C y posteriormente liofilizada. Por su parte, López, 2008 para la semilla de *Jatropha curcas* desgrasada y tratada con tres lavados de agua a 40°C , cocida por hora y media a 121°C y secada a 100°C y obtuvo una disminución de 93,5% tratando las muestras con soluciones de NaOH , NaOCl y llevada a la autoclave por 30 min a 121°C , 48,3% de disminución de ésteres de forbol en la tratada con 4 lavados de metanol al 92% y 32,2% para la tratada con 4 lavados de etanol al 92%.

ACEITE Y BIODIESEL DE *Jatropha curcas*

La demanda de aceites vegetales como fuente de biodiesel en particular, ha aumentado recientemente debido a una serie de factores, incluyendo el aumento de los precios del petróleo, el deseo de reducir las emisiones de CO_2 y garantizar la seguridad del combustible. Al mismo tiempo, hay mayor demanda de tierras, agua y otros recursos utilizados en la producción de alimentos para una población mundial en crecimiento y donde la mayor parte de los cultivos de hoy, incluyendo las semillas oleaginosas, son anuales. *Jatropha curcas* es una especie que ha recibido mucha atención recientemente por ser una especie tropical que tiene un ámbito geográfico más amplio que el aceite de palma. (King et al, 2009)

El contenido de aceite de semillas puede variar entre 18.4 y 42.3%, generalmente está en el intervalo de 30-35%. El aceite está normalmente en el núcleo de la semilla, con un contenido total de aceite de alrededor de 50-55%. El núcleo de la semilla contiene predominantemente lípidos y proteína, mientras que la cubierta contiene principalmente fibras. A escalas pequeñas es común ver que dejen la cubierta durante el proceso de extracción del aceite, a escalas industriales, la extracción se lleva a cabo sin la cubierta que es quemada y usada como combustible o como materia prima de biogás.

La calidad y consistencia de los aceites son importantes para la producción de biodiesel. La composición física y química del aceite de *Jatropha* puede ser muy

variable, pueden estar influenciadas por el ambiente y la genética como tamaño de la semilla, el peso y contenido de aceite, el vencimiento de los frutos pueden afectar la composición de los ácidos grasos del aceite, el almacenamiento y posterior tratamiento influyen en la calidad (Makkar, et al. 2009) La calidad también es importante a la hora de querer usar el aceite directamente como combustible. En general, es necesario asegurar la baja contaminación del aceite, un valor de acidez bajo, estabilidad a la oxidación y bajo contenido de fósforo, cenizas y agua. El aceite de *Jatropha* es relativamente viscoso, con bajo en contenido de ácidos grasos libres, mejorando su capacidad de almacenamiento, bajo contenido de azufre, indicando que es menos perjudicial en las emisiones de SO₂ cuando es usado directamente como combustible. (FAO, 2010)

Highina et al en 2011 obtuvieron biodiesel de *Jatropha curcas* con un rendimiento de 98% con respecto a aceite inicial, empleando ZnO como catalizador y metanol a la temperatura de reacción de 67°C. Berchmans et al, en 2007 obtuvieron un rendimiento de 90% de conversión de ácidos grasos de aceite de *Jatropha curcas* a ésteres metílicos mediante el procedimiento de transesterificación en dos etapas, la primera fue el pretratamiento ácido o esterificación con H₂SO₄ en donde se podría reducir el nivel de ácidos grasos libres del aceite de *Jatropha curcas* a menos del 1%. La segunda etapa, base alcalina catalizada con NaOH para el proceso de transesterificación con metanol, trabajando con un aceite con 15% de ácidos grasos libres, equivalentes a 29,8mg de KOH/g de aceite (índice de acidez).

La acidez del aceite, es debido a la presencia de ácidos grasos libres causados por la hidrólisis en el proceso de germinación en condiciones de alta humedad, no discrimina entre ácidos orgánicos y ácidos de los triacilglicerol por lipasas. Las lipasas actúan como catalizadores en reacciones lipolíticas (catabolismo de grasas y aceites) a través de la hidrólisis de los enlaces éster de acilglicerol. La hidrólisis enzimática consiste en la degradación de los triglicéridos,

fosfolípidos y glucolípidos en lípidos más simples, ácidos grasos libres, y ácido fosfático. En esta reacción intervienen enzimas propias de los alimentos o las generadas por microorganismos contaminantes como bacterias y hongos. Los ácidos grasos insaturados son los primeros afectados por la acción de las lipasas, mientras que los ácidos grasos saturados de cadena larga (palmítico y esteárico), son menos afectados. (Datateca.unad.edu.co)

Valores muy elevados de acidez en un aceite son un indicador de alto contenido de ácidos grasos libres y conllevan a tener baja calidad en los productos derivados de este aceite. Para inactivar las lipasas y con ello su efecto en el aceite se emplea el calor húmedo, incrementando el periodo de vida útil.

La presencia de los ácidos grasos libres promueve la desactivación del catalizador en la síntesis biodiesel, la formación de jabón, emulsificación y dificultad de separación de fases de la glicerina y el biodiesel e interfiere en el rendimiento y la composición de estas fases.

Garay et al, 2012 encontraron valores de índice de acidez de 1,2 a 6mg de KOH/g de aceite, que significa 0,6% a 3% de ácidos grasos libres (calculado como ácido oleico), para aceites de semilla de *Jatropha curcas* recolectadas en distintos periodos de maduración del fruto. Además, la separación del núcleo de semilla de *Jatropha curcas* y su secado debe realizarse rápidamente para evitar el aumento de la acidez del aceite.

En cuanto a aceite residual en la torta, éste también sufre el efecto de las lipasas que causan la hidrólisis de los triacilglicerolos, lo que podría causar un enranciamiento, malos olores y sabores en la harina final. Por lo tanto se hace necesario someter la torta a estabilización, que se realiza con el fin de inactivar la lipasa por medios físicos, empleando altas temperaturas o vapor húmedo o por medios químicos a través de la utilización de ácidos.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Acondicionamiento de la semilla de *Jatropha curcas*

Tabla 3. Reactivos, Materiales y equipos usados para acondicionamiento de semilla *Jatropha curcas* y extracción de JcO²

Reactivos	Uso
Agua	Lavados
Semilla <i>Jatropha curcas</i> no tóxica	Material de estudio
Semilla <i>Jatropha curcas</i> tóxica	
Materiales y equipos	
Plancha de calentamiento	Calentamiento
Alicate	Descascarar
Termómetro	Control de temperatura
Martillo	Descascarar
Contenedor metálico con tapa	Almacenamiento
Prensa Hidráulica tipo Carver	Extracción de aceite
Bolsas de tela	Medio filtrante
Molino IKA A11 Basic	Reductor de tamaño
Juego de tamices	Clasificación de tamaño de partícula
Ro-Tap	

5.1.1 Semilla *Jatropha curcas* no tóxica

La semilla *Jatropha curcas* cultivada en Antioquia, Colombia fue comprada a Colombiana de Biocombustibles S.A³ a \$ 66.000/kg. Esta semilla se considera poco tóxica, por lo que se encontró cubierta de Vivatax, un fungicida con el propósito de conservar el producto libre de agentes patógenos durante el transporte. Este estudio

² JcO Aceite de *Jatropha curcas*

³Centro de Investigación Colbio: kilómetro 53 Vía Santafé de Antioquia, Antioquia, Colombia

se realizó bajo el supuesto que el contenido de ésteres de forbol de esta semilla es menor que la considerada tóxica por lo que a lo largo del documento será identificada como la semilla no tóxica.

Debido a la naturaleza tóxica del fungicida, fue necesario realizar lavados con agua caliente a las semillas para retirarlo. Este procedimiento se realizó con agua corriente a 90°C, con lavados sucesivos hasta observar que el agua de lavado no presentara variación de color. Posteriormente, se dejaron secar las semillas por exposición al sol durante 6 horas.

Con las semillas secas, se separó el núcleo de la cubierta de manera manual. Los productos fueron almacenados en recipientes independientes en un lugar seco y fresco.

5.1.2 Semilla *Jatropha curcas* tóxica

La semilla *Jatropha curcas* tóxica cultivada en Tumaco, Colombia se compró a CODECAMPO S.A.S.⁴ a \$ 23.000/kg. No se encontró recubierta de fungicida, por lo que no se realizaron lavados con agua. Las condiciones de pelado y almacenamiento fueron las mismas mencionadas en la variedad no tóxica.

5.2 Extracción de aceite de *Jatropha curcas*

Se estableció un diseño experimental, con factores y niveles descritos en la tabla 4, para determinar la influencia de la temperatura de la semilla no tóxica y el tamaño de partícula con respecto a la eficiencia de la extracción del aceite utilizando la prensa hidráulica tipo Carver por 10 minutos aplicando 2500psi.

⁴ CODECAMPO. Calle 50 No 5A-66 Piso1 CCIAL, Cali, Valle del Cauca, Colombia

Tabla 4. Condiciones de operación durante extracción de JcO para diseño experimental

Nivel	Factor	
	Temperatura (°C)	Tamaño
Bajo (-1)	28	Molido
Medio (0)	60	Triturado
Alto (1)	100	Entero

Tabla 5. Condiciones de ensayos para extracción de JcO

No. Ensayo	Temperatura (°C)	Tamaño
1	28	Entero
2	60	Entero
3	100	Entero
4	28	Triturado
5	60	Triturado
6	100	Triturado
7	28	Molido
8	60	Molido
9	100	Molido

Según el diseño experimental propuesto, se realizaron 9 ensayos con las condiciones descritas en la tabla 5. Al finalizar el procedimiento de extracción se obtienen dos productos: aceite de y torta de *Jatropha curcas*.

5.3 Molienda de la torta de *Jatropha curcas*

Tabla 6. Materiales y equipos usados para molienda de torta de Jc⁵

Materiales y equipos
Molino IKA A11 Basic
Cuchilla REF A11.1
Cuchilla REF A11.2
Juego de tamices
Ro-Tap

Se utilizó dos tipos de cuchillas disponibles para el molino IKA A11 Basic (ver tabla 6) con el fin de determinar la más efectiva para la molienda de la semilla de torta de *Jatropha curcas*.

Tabla 7. Juego de tamices usados

No. Tamiz	Abertura (mm)
10	2,00
18	1,00
40	0,425
60	0,250
120	0,125
Colector	-----

El número del tamiz se refiere al retenido, es decir tamiz 18, pasante 10 retenido 18.

5.4 Análisis proximal de *Jatropha curcas*⁶

Cada análisis se realizó con tres repeticiones para disminuir el valor del error de medición, la desviación estándar fue utilizada como parámetro estadístico para evaluar la precisión de los análisis.

⁵ Jc: *Jatropha curcas*

⁶ Análisis realizado por Qca. Natalia Vanessa Arias Cardona

Los análisis proximales realizados, se realizaron según la metodología descrita por Arias en 2013 para:

- Determinación de humedad
- Determinación de cenizas
- Determinación de extracto etéreo
- Determinación de proteínas

5.5 Caracterización del aceite de *Jatropha curcas*⁷

La caracterización del aceite se realizó según la metodología descrita por Restrepo en 1994 para:

- Determinación de densidad por picnometría
- Determinación de índice de refracción
- Determinación de índice de saponificación
- Determinación de materia insaponificable
- Determinación de índice de yodo
- La Determinación de ácidos grasos se realizó según la metodología descrita por Arias en 2013.

5.6 Estudio de estabilización de la harina de *Jatropha curcas*

Tabla 8. Reactivos, materiales y equipos usados para estudio de estabilización de harina de Jc

Reactivos
Harina de <i>Jatropha curcas</i> no tóxica
Éter de petróleo
Benceno
Etanol

⁷ Análisis realizado por Qca. Natalia Vanessa Arias Cardona

Fenolftaleína
Materiales y equipos
Autoclave horizontal
Frascos con tapa
Balanza
Equipo Soxhlet
Rotaevaporador
Bomba de vacío
Bureta
Probeta
Plancha de agitación

Para realizar el estudio de estabilización de la harina de *Jatropha curcas* no tóxica, se utilizó una autoclave horizontal, donde se varió el tiempo de exposición al vapor y se midió el porcentaje de ácidos grasos libres en un periodo de 23 días. El porcentaje de ácidos grasos libres se aproximó al porcentaje de ácido oleico en cada muestra. Durante el análisis las muestras fueron almacenadas en frascos de vidrio, tapadas y en ambiente fresco y seco.

5.6.1 Determinación de contenido de ácidos grasos libres

Se llevó a cabo el procedimiento para la determinación de ácidos grasos libres por duplicado para cada muestra independientemente implementando el método descrito por Restrepo en 1994.

5.7 Estudio de detoxificación de la torta de *Jatropha curcas*

5.7.1 Detoxificación de torta de *Jatropha curcas*

Se utilizó un método químico de detoxificación con tratamiento térmico previo, el cual consiste en lavados consecutivos de la torta de *Jatropha curcas* con

etanol al 96% en volumen. Se estudió la influencia de la cantidad de lavados en el contenido de ésteres de forbol. Además se determinó la influencia al realizar detoxificación y estabilización en simultáneo.

El proceso de detoxificación constó de las siguientes etapas:

1. Tratamiento térmico: Se realizaron tres (3) lavados sucesivos con agua destilada a 40°C conservando una proporción 1:2 de harina:agua en volumen. Luego a la torta lavada y filtrada, se le agregó agua destilada en proporción 1:1,5 de harina:agua en volumen y se le llevó a cocción en el horno a 120°C por 1,5 horas. Luego se secó en el horno a 100°C.
2. Tratamiento químico: Se realizó lavados sucesivos con etanol al 96% en volumen conservando una proporción 1:10 de harina:etanol en volumen. Luego se varió el número de lavados entre 2 y 4.

Tabla 9. Tratamientos realizados a las tortas de semilla de Jc

Nomenclatura de muestra	Tipo de torta <i>Jatropha curcas</i>	No. de lavados con etanol	Con estabilización
Sin TTOT	Tóxica	Sin tratamiento	
2 TTOE		2	No
3 TTOE		3	No
4 TTOE		4	No
4 TTOE+EST		4	Con estabilización Sin tratamiento térmico previo
Sin TTONT	No tóxica	Sin tratamiento	

El proceso de estabilización utilizado para las muestras analizadas durante el estudio de detoxificación se determinó bajo los resultados obtenidos en el estudio de estabilización, el cual arrojó 10 minutos como mejor tiempo de exposición al vapor en autoclave.

5.7.2 Determinación de ésteres de forbol en las muestras

Esta determinación se realizó teniendo en cuenta que por falta de un estándar de los ésteres de forbol, no se podía obtener un resultado cuantitativo, por lo tanto se determinó la presencia o no de estos compuestos para establecer una reducción porcentual a partir de las señales registradas de la muestra que reportara el mayor contenido de ésteres de forbol.

5.7.3 Preparación de las muestras para análisis en HPLC

El método para la preparación de muestras aplicado fue adaptado del Método Vórtex (Devappa et al, 2013)

Se pesó 0,5 g de harina de *Jatropha curcas* y se llevó a un tubo de ensayo donde se agregó 2 ml de MeOH, la mezcla se llevó a un vórtex a 2500 rpm por 3 minutos, luego se sonicó por 5 minutos, nuevamente en vórtex por un minuto y se centrifugó a 2000 rpm por 5 minutos para recuperar la capa sobrenadante de MeOH con el extracto de interés. Este proceso fue repetido por tres veces para el residuo obtenido agregando cada vez dos ml de MeOH y reuniendo los sobrenadantes contenedores del extracto de ésteres de forbol. Al finalizar el proceso de extracción, la solución se llevó a rotaevaporación y el concentrado obtenido fue diluido en 0,5 ml de solución de ácido O-fosfórico (2,05 ml en 1 litro de agua grado HPLC). La nueva solución fue microfiltrada y almacenada en viales de 1,5 ml de capacidad para posterior análisis en HPLC.

5.7.4 Método de HPLC para determinación de ésteres de forbol

Se desarrolló el método de Devappa et al 2013 adaptado.

El sistema de cromatografía líquida para llevar a cabo el método fue un HPLC-DAD Shimadzu con detector (arreglo de diodos para UV-Vis). La fase móvil usada fue ácido O-fosfórico (2,05 ml en 1 litro de agua grado HPLC; Solvente A) y acetonitrilo (CH₃CN grado HPLC; Solvente B). La columna usada (fase reversa) con empaque de sílica C18. Restek Pinnacle DBAQC18 (100 mm; 3,2 mm; 3 µm). Para

la fase móvil se usó un gradiente de 0-3 minutos 100% solvente A y 0% solvente B, de 3-25 minutos de 100% a 50% solvente A y de 0% a 50% solvente B, de 25-30 minutos 50% solvente A y 50% solvente B, de 30-35 minutos de 50% a 100% solvente A y de 50% a 0% solvente B y de 35-38 minutos 100% solvente A y 0% solvente B. En cada corrida la inyección de solución fue 10µl.

5.8 Producción de biodiesel a partir de aceite de *Jatropha curcas*

El proceso de producción de biodiesel desarrollado fue adaptado del método de Berchmans et al 2007.

Paso 1: Pretratamiento ácido (Esterificación catálisis ácida)

Objetivo: reducir los valores de ácidos grasos del JcO (en caso de no ser reducidos, estos reaccionarían con la base durante la catálisis básica formando jabones)

Tabla 10. Reactivos usados durante pretratamiento ácido para la producción de biodiesel

Reactivo	Densidad	Proporción w/w JcO	masa g	Volumen ml
JcO	0,91g/ml	100/100	45,5	50
H ₂ SO ₄	1,84g/ml	1/100	0,46	0,25
MeOH	0,79g/ml	70/100	31,85	40,31

Tabla 11. Condiciones de operación de esterificación catálisis ácida

Variable	Dato
Temperatura de reacción (°C)	50
Temperatura de Rota-evaporador (°C)	54
Revoluciones de rota-evaporador (rpm)	145
Tiempo de reacción (horas)	1

Se preparó una solución de H_2SO_4 y MeOH con las cantidades descritas en la tabla 10. Luego se le agregó al JcO, el cual se calentó previamente hasta la temperatura de operación de la reacción. Se dejó transcurrir la reacción de acuerdo a las condiciones descritas en la tabla 11.

Luego se llevó la solución obtenida a un embudo separador durante 20 horas, obteniendo una fase acuosa que se desechó (superior) y una oleosa (inferior) que se pasó a la transesterificación.

Paso 2. Transesterificación mediante catálisis básica.

Tabla 12. Reactivos usados durante la transesterificación para la producción de biodiesel a partir de JcO

Reactivo	Proporción w/w JcO _{inicial}	Masa (g)	Volumen (ml)
Fase oleosa de obtenida de la esterificación	156/100	45,5	50
NaOH	1,4/100	0,637	--
MeOH	24/100	10,92	13,82

Tabla 13. Condiciones de operación de la transesterificación del JcO para la producción de biodiesel

Variable	Dato
Temperatura de reacción (°C)	65
Temperatura de Rota-evaporador (°C)	68
Revoluciones de rota-evaporador (rpm)	145
Tiempo de reacción (horas)	2

Para la formación del metóxido se agregó el NaOH al MeOH, en proporciones descritas en la tabla 12, en constante agitación hasta obtener una solución homogénea. Luego se adicionó el metóxido a la fase oleosa previamente calentada hasta la temperatura de operación y se dejó reaccionar por 2 horas. Al terminar se

llevó la solución obtenida al embudo separador por 48 horas, donde se obtuvo dos fases, la correspondiente al biodiesel (superior) y la glicerina (inferior).

La caracterización del biodiesel se realizó por el método de cromatografía de gases adaptada a espectrometría de masas (GC/MS) usando un μl de biodiesel al cromatógrafo que operó bajo las condiciones descritas en la tabla 14.

Tabla 14. Condiciones implementadas en el método de GC/MS

CONDICIÓN	DATO
Temperatura de calentador de la columna (°C)	40
Temperatura de inyección (°C)	250
Modo de inyección	Ruptura
Modo de control de flujo	Presión
Presión (kPa)	15,0
Flujo total (ml/min)	36
Flujo de la columna (ml/min)	0,59
Velocidad lineal(cm/s)	27,8
Flujo de purga (ml/min)	0,0
Razón de ruptura	60,0
Inyección a alta presión	OFF
Portador de ahorro de gas	OFF
Razón de ruptura de portador de ahorro de gas	5,0

6.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Acondicionamiento de las semillas

Tabla 15. Resultados y rendimientos de descascarado de las semillas de *Jatropha curcas* para la variedad tóxica y no tóxica

	Tóxica	No tóxica
Peso semilla completa (g)	1300	2000
Peso de núcleo (g)	870	930
Peso de cubierta (g)	420	647
Rendimiento de pelado (%)	66,92	46,50
Pérdida del procedimiento (%)	0,77	21,15

El porcentaje de rendimiento de pelado hace referencia al porcentaje de núcleo útil, comparado con la semilla completa, es decir con cubierta, incluyendo las pérdidas por procedimiento.

El porcentaje de pérdida del procedimiento hace referencia en ambas variedades a pérdidas por pelado, como rupturas de núcleo y formación de polvillo. En la variedad no tóxica, se incluye además las pérdidas de semillas a las cuales en el proceso de lavado se filtró agua al interior de éstas y se dañaron.

Se puede observar que el rendimiento de pelado fue mayor para la variedad tóxica (66,92%) que la no tóxica (46,5%), esto se debe principalmente a el proceso de lavado de la última para eliminar el fungicida, lo cual ocasiona una pérdida de semilla del 21,15%. Para posteriores cálculos sobre pelado de semilla se emplearon los resultados de la *Jatropha curcas* tóxica debido a que el uso del fungicida es opcional.

6.2 Análisis proximal de núcleo de semilla de *Jatropha curcas* tóxica

Tabla 16. Análisis proximal de núcleo de semilla de Jc tóxica

Variable	Promedio	Ref. ⁸	Diferencia
% Humedad	5,43±1,84	3,4	-2,0
% Lípidos	49,59±0,32	59,8	10,2
% Proteína	18,13±1,93	23,0	4,9
% Cenizas	5,36±0,32	3,7	-1,7
% Fibra	21,49	----	----

Comparando el núcleo de la semilla analizado con los datos de referencia, se encuentra que el primero presenta porcentajes de lípidos y proteína inferiores a los de referencia, teniendo una influencia negativa sobre la elección de este tipo semilla para la ejecución de un proyecto de explotación donde estas variable sean importantes, en especial el porcentaje de lípidos menores al 10% respecto al dato de referencia.

6.3 Análisis proximal de núcleo de semilla de *Jatropha curcas* no tóxica

Tabla 17. Análisis proximal de núcleo de semilla de Jc no tóxica

Variable	Promedio	Ref. ⁹	Diferencia
% Humedad	5,63±0,10	5,8	0,2
% Lípidos	56,96±1,88	62,1	5,1
% Proteína	20,53±2,12	28,8	8,3
% Cenizas	4,96±0,03	4,5	-0,5
% Fibra	11,92	----	----

⁸ (Makkar et al, 1998) comparada con variedad de Cabo Verde convirtiendo los datos a base húmeda.

⁹ (Makkar et al, 1998) comparada con variedad mexicana no tóxica convirtiendo los datos a base húmeda.

Al igual que en el análisis proximal realizado a la semilla tóxica, se encuentra que la semilla no tóxica tiene desventajas con respecto al dato de referencia en los porcentajes de lípidos y proteína, con más del 5% por debajo. Sin embargo, al comparar los análisis proximales obtenidos para ambas semillas, la semilla de Jc no tóxica se presenta como la mejor alternativa con 7,4% de lípidos y 2,4% de proteína por encima de los datos de la semilla tóxica.

6.4 Extracción de aceite de *Jatropha curcas*

Tabla 18. Aceite extraído y eficiencia de extracción de JcO según diseño experimental

Temperatura (°C)	Tamaño	Aceite extraído (g)	Eficiencia de extracción (%)
28	Entera	24,1	42,3
60	Entera	32,6	57,2
100	Entera	29,3	51,4
28	Triturada	27,9	48,9
60	Triturada	35,0	61,4
100	Triturada	31,3	54,9
28	Molida	28,6	50,2
60	Molida	35,6	62,5
100	Molida	34,9	61,2

La eficiencia de la extracción es comparada con 57% de lípidos contenido en el núcleo de la semilla de *Jatropha curcas* no tóxica reportado en la sección de análisis proximal de núcleo para la misma. Obteniéndose las mayores eficiencias de extracción mostradas en la tabla 19.

Tabla 19. Mejores resultados para extracción de JcO

Temperatura (°C)	Tamaño	Eficiencia (%)
60	Triturado	61,4
60	Molida	62,5
100	Molida	61,2

En la anterior tabla se pueden comparar más fácilmente las mejores eficiencias con respecto a las condiciones implementadas, de donde se tiene que la mayor eficiencia está dada para la semilla molida y previamente calentada a 60°C. Sin embargo es importante resaltar que con una diferencia de 1,1% por debajo está la semilla triturada y calentada a 60°C, por lo que se puede afirmar que es posible obtener eficiencias entre 61,4% y 62,5% con una molienda poco rigurosa y precalentando la semilla a 60°C, logrando un ahorro de energía al disminuir el tiempo de molienda.

Por otro lado, se puede resaltar la eficiencia obtenida a las condiciones de semilla entera y temperatura de precalentamiento 100°C, donde sería necesario realizar un análisis costo-beneficio para evaluar el ahorro de energía de molienda contra la inversión de energía para precalentar la semilla y el riesgo de deterioro de la semilla al quemarse.

6.4.1 Análisis de varianza ANOVA del diseño factorial

Tabla 20. Análisis de varianza para eficiencia de extracción

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	116,689	1	116,689	33,05	0,0105
B:Tamaño	90,2488	1	90,2488	25,56	0,0149
AA	160,683	1	160,683	45,51	0,0067
AB	0,9604	1	0,9604	0,27	0,6381
BB	1,91427	1	1,91427	0,54	0,5149
Error total	10,5931	3	3,53104		
Total (corr.)	381,088	8			

ANOVA

R-cuadrada = 97,2203 %

R-cuadrada (ajustada por gl) = 92,5875 %

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 97,2203% de la variabilidad en Eficiencia de extracción. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 92,5875%.

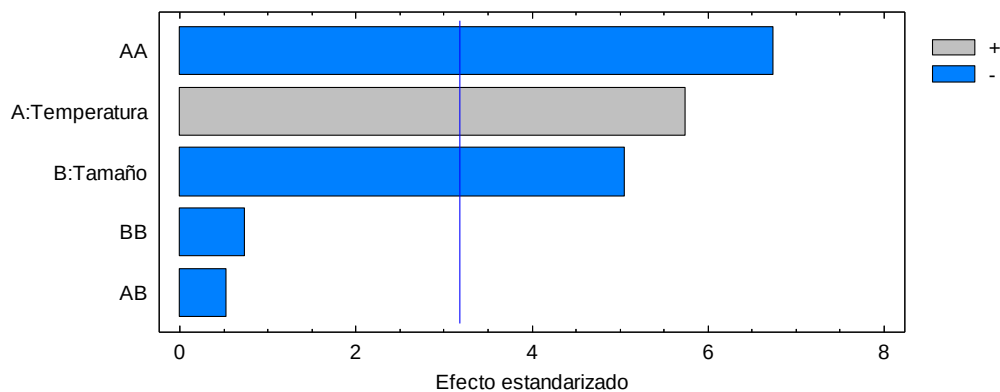


Figura 4. Eficiencia de extracción de JcO. Diagrama de Pareto estándar.

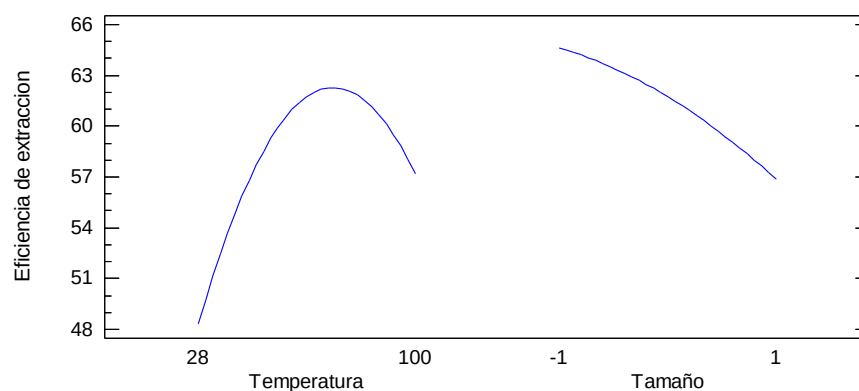


Figura 5. Eficiencia de extracción de JcO. Diagrama de efectos.

La tabla ANOVA parte la variabilidad de eficiencia de extracción en piezas separadas para cada uno de los efectos, entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen un valor -P menor que 0,05 (A, B y AA), indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95%; lo que evidencia el diagrama de Pareto donde estos mismos 3 efectos son los que influyen significativamente en la eficiencia de extracción.

Hay que resaltar que el efecto AA (efecto de la temperatura aislado de los otros efectos) produce una influencia negativa, lo que quiere decir que en el proceso

de extracción de aceite de *Jatropha curcas* no se cumple que a mayor temperatura mayor eficiencia, información que se evidencia más claramente en el Diagrama de Pareto estándar; en donde se observa que el efecto del tamaño en positivo, es decir a menor tamaño de partícula mayor eficiencia.

6.5 Molienda de la torta de *Jatropha curcas* no tóxica

Durante la molienda se presentó una pérdida de material inferior 2,5%, considerada muy baja para este tipo de operación, esto se le atribuye a que la molienda se realizó en un molino a escala de laboratorio con una capacidad máxima de 100g de torta de *Jatropha curcas*, por lo que fue necesario realizar la molienda dividiendo la torta en 3 porciones de 95g cada una y mezclando el producto de la molienda para realizar el análisis granulométrico.

Tabla 21. Análisis granulométrico para cada cuchilla utilizada

Cuchilla	Material retenido (g)		Fracción retenida		Fracción acumulada	
	A11.1	A11.2	A11.1	A11.2	A11.1	A11.2
Tamiz 10	71,5	65,3	0,257	0,247	1,000	1,000
Tamiz 18	99,3	63,0	0,357	0,238	0,743	0,753
Tamiz 40	62,4	110,5	0,224	0,418	0,386	0,515
Tamiz 60	33,6	22,8	0,120	0,086	0,162	0,097
Tamiz 120	11,3	3,0	0,041	0,011	0,042	0,011
Colector	0,4	0,0	0,001	0,000	0,001	0,000
Total	278,5	264,6				

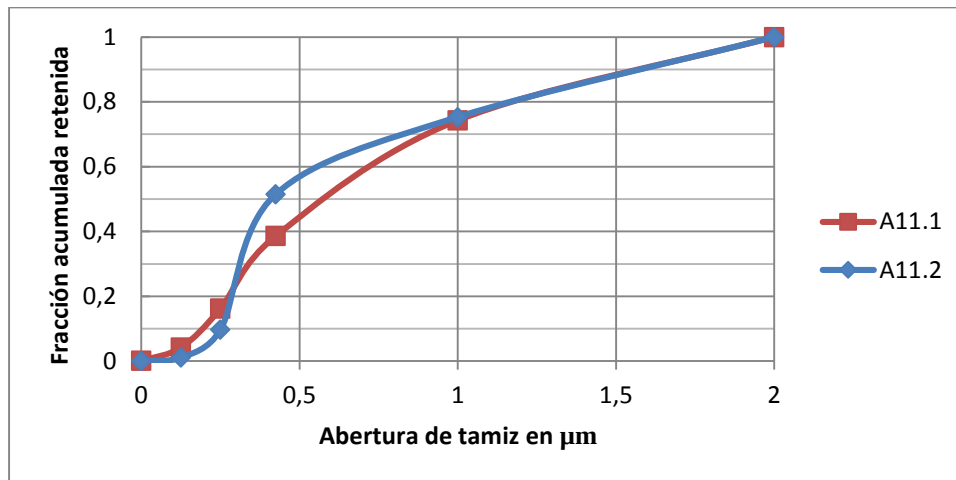


Figura 6. Análisis granulométrico acumulado para torta de Jc no tóxica para dos cuchillas.

La diferencia más notoria y relevante de la gráfica anterior es que la cuchilla A11.2 (Bordes cuadrados y gruesos) alcanza una mayor fracción acumulada para un tamaño de partícula interior 0,5μm, el tamaño de partícula máximo elegido para aceptar la harina. Teniendo en cuenta que la comparación entre cuchillas se hizo manteniendo el tiempo de molienda, elegir la cuchilla A11.2 sobre la A11.1 (bordes delgados curvos y afilados) implicaría un ahorro de energía en esta parte del proceso.

6.6 Análisis proximal de la torta de *Jatropha curcas*

La interpretación de los siguientes análisis proximales se hace partiendo de que la torta analizada tiene un alto contenido de lípidos en comparación con el dato de referencia, para reducirlo sería necesario implementar un método de extracción por el método prensa-solvente, por esta razón para la que la comparación sea más acertada, el análisis se refiere los datos en base libre de lípidos.

Tabla 22. Análisis proximal torta de Jc tóxica

Variable	Promedio	Base libre de lípidos	Ref.¹⁰	Diferencia
% Humedad	5,77±0,06	7,10	3,4	-3,7
% Lípidos	18,75±0,35	--	1,6	(-17,1) ¹¹
% Proteína	23,24±0,42	28,60	58,4	29,8
% Cenizas	6,69±0,02	8,23	9,9	1,7

La diferencia más marcada e importante está en el contenido de proteína con una diferencia de 17,1% menos para la torta analizada con respecto al dato de referencia, reduciendo el valor agregado bajo el cual se plantea el interés en la utilización de esta semilla.

Tabla 23. Análisis proximal de torta de Jc no tóxica

Variable	Promedio	Base libre de lípidos	Ref¹²	Diferencia
% Humedad	4,96±0,06	6,31	5,8	-0,5
% Lípidos	21,38±0,15	--	1,1	(-20,3) ¹³
% Proteína	27,53±2,47	35,01	67,7	40,2
% Cenizas	7,01±1,03	8,92	10,4	-1,48

Al igual que en el análisis proximal de la torta de Jc tóxica, se nota muy marcada la diferencia negativa para el contenido de proteína con un 35,01% en la torta analizada contra un 67,7% para el dato de referencia. Sin embargo, al comparar ambos análisis proximales, se observa que la torta de semilla no tóxica tiene 4,3% más proteína que la torta de semilla tóxica, siendo preferible la semilla no tóxica en la elección para la implementación de proceso.

¹⁰ (Makkar et al,1997) comparada con variedad de Cabo verde

¹¹ La diferencia es comparada con los datos promedio

¹² (Makkar et al,1997) comparada con variedad mexicana no tóxica

¹³ La diferencia es comparada con los datos promedio

6.7 Caracterización del aceite de *Jatropha curcas*

Tabla 24. Distribución de ácidos grasos identificados por cromatografía de gases en JcO

Tipo de ácidos grasos	Tóxica	No Tóxica	Ref. ¹⁴
	% área	% área	%
Saturados	20,2845	20,0398	21,6
Insaturados	79,7155	79,9602	77,5 ¹⁵
Transisómeros	0	0	-
Monoinsaturados	36,2003	47,0374	45,4
Poliinsaturados	43,5151	32,9228	33

Al comparar los resultados obtenidos para el JcO de ambas variedades estudiadas con los datos de referencia, se encuentra que la proporción entre ácidos grasos saturados e insaturados se conserva. No obstante, al comparar la distribución de los mono y poliinsaturados, se observa que los datos de referencia son más cercanos al JcO no tóxico.

Los aceites mayoritariamente monoinsaturados presentan índices de yodo entre 50 y 100, para efectos de calidad del carburante, mientras más saturado es el aceite, mejor es. Por el contrario, en caso de usar el aceite en alimentación, es más conveniente que éste sea mono y poliinsaturado con configuraciones cis.

En caso de usar un aceite para alimentos, es importante tener en cuenta que la presencia de transisómeros aumenta el riesgo de enfermedades coronarias si determinados niveles son consumidos rutinariamente. El caso del aceite de *Jatropha curcas* se ve favorecido con una ausencia total de estos compuestos.

Para el caso de los aceites analizados, se encuentra que ambos tienen el mismo contenido de ácidos grasos saturados e insaturados. Sin embargo, existe

¹⁴ (Akbar et al,2009)

¹⁵ (revista.unal.edu.co, 2010)

una diferencia marcada e importante en la distribución de ácidos grasos insaturados, obteniéndose que la mejor distribución para el aceite de *Jatropha curcas* no tóxico por tener un contenido mayor de ácidos grasos monoinsaturados siendo que éste sea empleado en alimentos o producción de biodiesel.

Tabla 25. Perfil de ácidos grasos identificados por cromatografía de gases en JcO

No. Pico	Compuesto	Tóxica	No Tóxica	Ref. ¹⁶
		% área	% área	%
1	Ácido caprílico (8:0)	0,1092	0,0943	-
2	Ácido mirístico (14:0)	0,2748	0,1916	0,1
3	Ácido palmítico (16:0)	13,8605	12,1845	14,2
4	Ácido palmitoleico (16:1)	0,7595	0,5974	0,7
5	Ácido margárico (17:0)	0,1203	0,1107	0,1
6	Ácido esteárico (18:0)	5,7531	7,0975	7,0
7	9 cis ácido oleico (18:1)	34,1546	45,2490	44,7
8	7 cis ácido oleico (18:1)	1,2064	1,1055	-
9	Ácido linoléico (18:2)	42,9229	32,1985	32,8
10	Cis alfa ácido linolénico (18:3)	0,1436	0,1674	0,2
11	Ácido araquídico (20:0)	0,1665	0,2599	0,2
12	Ácido gadoleico (20:1)	0,0799	0,0854	-
13	Ácido docosadienoico (22:2)	0,4487	0,5570	-
14	Ácido tricosílico (23:0)	-	0,1012	-

Se encuentra una mayor correspondencia entre los datos de referencia con los que se comparan los resultados del análisis y el JcO no tóxico. La diferencia más relevante en los resultado del análisis de composición de ácidos grasos está en los contenidos de ácidos oleico y linoléico también conocidos como omega 9 y omega

¹⁶ (Akbar et al,2009)

6 con una presencia de 34,2344% y 42,9229% en el JcO tóxico mientras en el JcO no tóxico 45,3345% y 32,1985 respectivamente mostrando un efecto cruzado en la concentración de los ácidos grasos mencionados.

Con un 46,3% de ácido oleico en el aceite de *Jatropha curcas* para la variedad considerada no tóxica, se encuentra que éste es el aceite con mejores características aproximándose al aceite de oliva que contiene entre 68% y 81% de ácido oleico y considerada una grasa monoinsaturada de la mejor calidad. (Lozano et al, 2009)

Tabla 26. Características físico-químicas del JcO

Variable	Tóxica	No tóxica	Ref.¹⁷
Densidad (g/ml a 25°C)	0,91	0,91	0,91
Índice de refracción (a 25°C)	1,4688	1,4437	1,4688
Índice de saponificación (mg KOH/1g aceite)	192	190	196
Índice de yodo (g I/100 g aceite)	95	99	99,06
Materia insaponificable (%)	0,80	0,84	0,82

Comparando los resultados los aceites analizados con los datos de referencia, se encuentra que no existen diferencias importantes.

La densidad relativa y el índice de refracción de la mayoría de los aceites y grasas vegetales se encuentran en intervalos muy cercanos (densidad relativa 0.910-0.927 (0,90997-0,92697 g/ml), e índice de refracción entre 1.448-1.477). La mayoría de los aceites presentan índices de saponificación menores a 200 (170-198) índices de yodo superiores a 75 (75-94 para aceite de olivo y superiores a 100 para el resto) llegando hasta 150 en el aceite de cártamo. (Iturbe, UNAM). En el

¹⁷ (jatropha.es, 2009)

caso de los aceites analizados, todos los resultados de caracterización se encuentran de los rangos mencionados.

Dado que los aceites están formados por triglicéridos principalmente, y que cada triglicérido necesita 3 moléculas de KOH para saponificarse, el índice de saponificación puede ser usado para estimar el peso molecular promedio del aceite utilizado siendo 885,88g/mol JcO tóxico 875,65g/mol JcO no tóxico según la conversión: $\text{Peso molar del aceite} = 3 \times 56,01 / (\text{índice de saponificación} / 1000)$

El índice de yodo indica la presencia de dobles enlaces, para la utilización de un aceite en la producción de biodiesel se prefieren los que presenten menor índice de yodo, el aceite es no secante o no polimerizante con índice de yodo menor 110, más estable a la oxidación, indica además un mayor número de cetano lo que traduce en una mejor calidad de combustión. El biodiesel producido a partir del aceite de *Jatropha curcas* puede ser sometido a las altas temperaturas dentro del motor, con bajo riesgo de formación de depósitos sólidos que lo afecten y deterioro en el aceite lubricante, con poca operatividad a bajas temperaturas, tendrá una buena estabilidad y podrá ser almacenado durante más tiempo tanto antes de su uso como en el mismo motor sin sufrir degradación, en caso de tener dos aceites con índice de yodo igual o similar, se debe dar prioridad al que tenga mayor contenido de monoinsaturados sobre aquel que tenga mayor contenido de poliinsaturados, que para el caso de los aceites analizados la prioridad se le da al proveniente de la variedad no tóxica.

La materia insaponificable puede dar lugar a menores rendimientos en la producción de biodiesel y a la formación de impurezas y depósitos durante su combustión en el motor. En aceites para la producción de biodiesel se establece un contenido de materia insaponificable menor a 0,8% para cumplir con norma europea y tener menor riesgo de sólidos en el biodiesel producido.

6.8 Estudio de estabilización

Tabla 27. Reporte de ácidos grasos libres para el tiempo de exposición al vapor: 5 minutos

	1 día	9 días	17 días	23 días
% ácidos grasos libres (promedio)	0,5	0,3	0,3	0,4

Tabla 28. Reporte de ácidos grasos libres para el tiempo de exposición al vapor: 10 minutos

	1 día	9 días	17 días	23 días
% ácidos grasos libres (promedio)	0,5	0,3	0,4	0,3

Tabla 29. Reporte de ácidos grasos libres para el tiempo de exposición al vapor: 15 minutos

	1 día	9 días	17 días	23 días
% ácidos grasos libres (promedio)	0,4	0,3	0,4	0,4

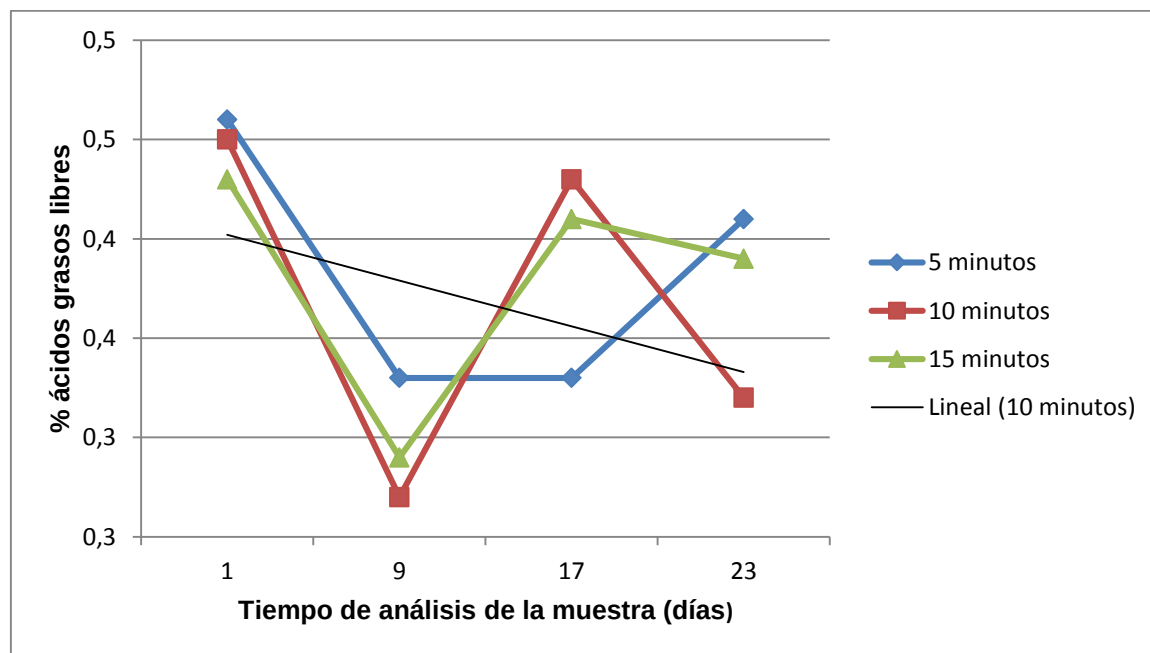


Figura 7. Análisis de estabilidad de harina de *Jatropha curcas* no tóxica para cada tiempo de exposición al vapor en autoclave.

Los resultados para el análisis de estabilidad muestran que en ninguno de los casos analizados existe un aumento de porcentaje de ácidos grasos contenidos en la harina de Jc no tóxica estabilizada con respecto al primer día de análisis, de lo que se deduce que los tres tiempos de exposición estudiados tuvieron el efecto esperado de la inactivación de las lipasas. Sin embargo, los tres tratamientos tienen diferencias significativas determinantes para la elección del mejor tiempo de exposición, principalmente en el efecto global, donde a pesar de que todos presentan una tendencia a disminuir el contenido de ácidos grasos inicial, la disminución más importante se obtiene a los 10 minutos de exposición, con una pendiente de -0,023 comparada con -9E-17 para 15 minutos y -0,015 para 5 minutos de exposición al vapor en autoclave.

6.9 Estudio de detoxificación de la torta de *Jatropha curcas*

Tabla 30. Pérdidas de masa de torta de *Jatropha curcas* durante tratamientos independientes de detoxificación

Tipo de TTO ¹⁸	Pérdida de masa de torta
TTOTE ¹⁹	-15,0
1 TTOE ²⁰	10,5%
2 TTOE	5,3%
3 TTOE	10,5%
4 TTOE	11,8%

Los resultados muestran que durante el tratamiento térmico hay un aumento de masa que se le atribuye a un aumento de humedad de la harina. Sin embargo, para los tratamientos con etanol, se nota que a excepción de la muestra 2 TTOE que muestran un comportamiento anómalo, las pérdidas de las demás muestras son cercanas al 11%, esto se debe a que las pérdidas importantes se dan durante

¹⁸ TTO: Tratamiento

¹⁹ TTOTE: Tratamiento térmico

²⁰ TTOE: Tratamientos con etanol

el primer lavado donde el etanol arrastra las partículas con tamaño inferior al tamaño del poro del filtro mientras que para el mayor número de lavados, estas partículas ya no están presentes y la harina no sufre gran variación, por otro lado, no hay ninguna ganancia de materia ya que durante el secado de la harina posterior a la detoxificación, se elimina el contenido de etanol presente luego de la filtración.

6.9.1 Estimación de presencia de ésteres de forbol

En los espectros UV para los ésteres de forbol publicados para los diferentes factores identificados en la *Jatropha curcas*, las principales características en común encontradas son el valle cercano a 240nm y el pico cercano a 280nm, por esta razón, en este estudio la interpretación de los cromatogramas obtenidos por HPLC se hizo seleccionando el pico con tiempo de retención de 8,4 (factor α en este documento) y su respectivo reporte a 280nm para analizar su comportamiento según los tratamientos efectuados.

Tabla 31. UV's comparativos para el pico analizado en los cromatogramas de HPLC para la detección de los ésteres de forbol en semilla de *Jatropha curcas*.

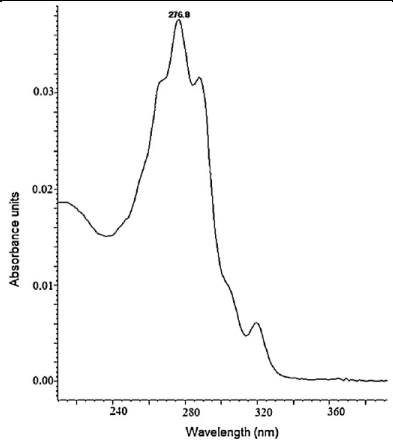
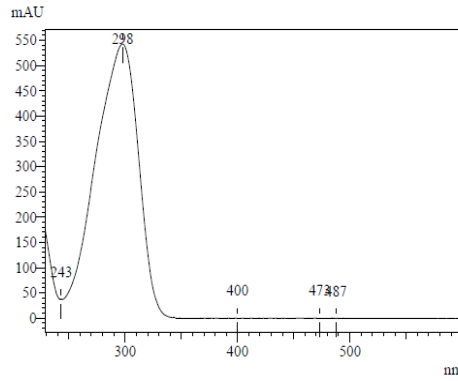
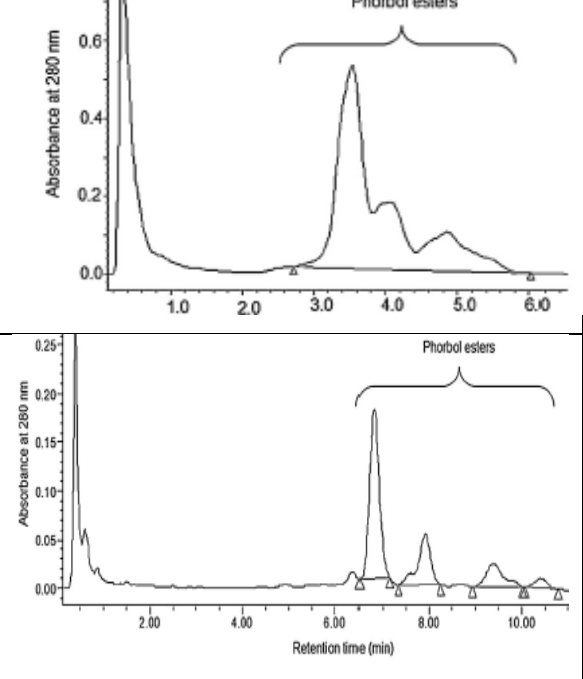
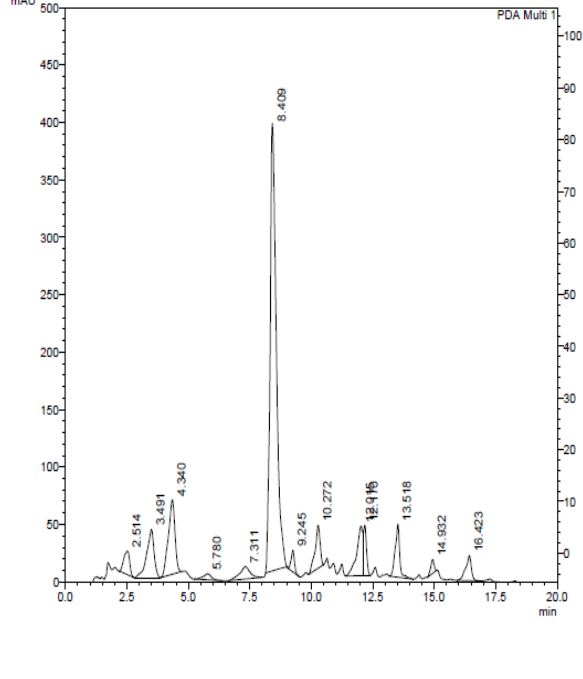
UV de pico con los que se comparan las muestras analizadas	UV de pico α obtenido en los análisis por HPLC
 The graph shows absorbance units on the y-axis (0.00 to 0.03) and wavelength in nm on the x-axis (240 to 360). A prominent peak is labeled at 276.9 nm.	Retention Time : 8.409 Compound Name : Spectrum Operation : None  The graph shows mAU on the y-axis (0 to 550) and wavelength in nm on the x-axis (300 to 500). A peak is labeled at 298 nm. Other labels on the x-axis include 243, 400, 473, and 487.
(Devappa et al, 2013)	Tomado de análisis por HPLC de torta tóxica sin tratamiento

Tabla 32. Cromatogramas (HPLC) comparativos para método implementado en la detección de ésteres de forbol en semilla de *Jatropha curcas*.

Cromatogramas (HPLC) de referencia para cuantificación por método rápido de ésteres de forbol en semilla de <i>Jatropha curcas</i>.	Cromatograma (HPLC) para método adaptado de la referencia, implementado en la determinación de ésteres de forbol de las muestras analizadas de semilla de <i>Jatropha curcas</i>.
	
(Devappa et al, 2013)	Tomado de análisis por HPLC de torta tóxica sin tratamiento a la absorbancia de 280nm

De las anteriores tablas, se puede comentar que el método implementado tuvo el efecto esperado en la correcta separación de compuestos durante el análisis por HPLC y se logró una caracterización del pico que presentó un UV correspondiente al de los ésteres de forbol según sus particularidades. Además, los cromatogramas muestran que se logró una separación de compuestos mucho mejor durante el análisis que la mostrada en la referencia y la definición de los UV fue mejor.

6.9.1.1 Variedad *Jatropha curcas* tóxica

Tabla 33. Resultados de HPLC para los diferentes tratamientos de la harina de *Jatropha curcas* tóxica

Tipo de TTO	Retención (min)	Altura del pico α (mAU)
Sin TTOT	8,409	389742
2 TTOE	8,227	224463
3 TTOE	8,247	176394
4 TTOE	8,303	64001
4 TTOE +EST	8,279	108587

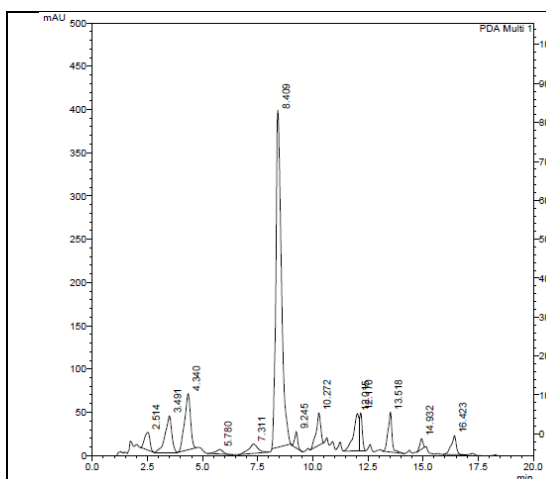


Figura 8. Cromatograma (HPLC) de la harina de *Jatropha curcas* tóxica a 280nm

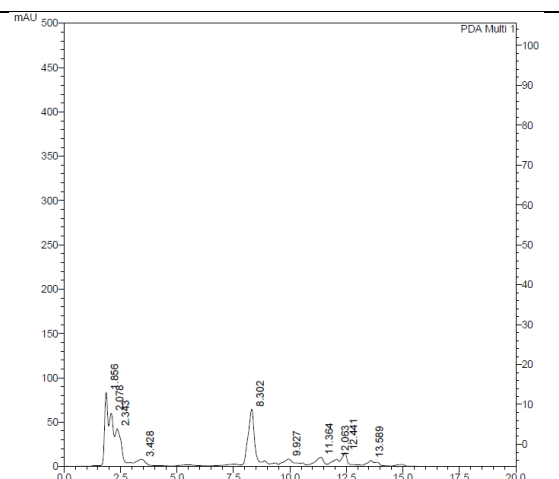


Figura 9. Cromatograma (HPLC) de la harina de *Jatropha curcas* tóxica con mejor tratamiento 4 TTOE a 280nm

6.9.1.2 Variedad *Jatropha curcas* no tóxica

Tabla 34. Resultados de HPLC la harina de *Jatropha curcas* no tóxica

Tipo TTO	Retención (min)	Altura del pico α (mAU)
Sin TTONT	8.528	141030

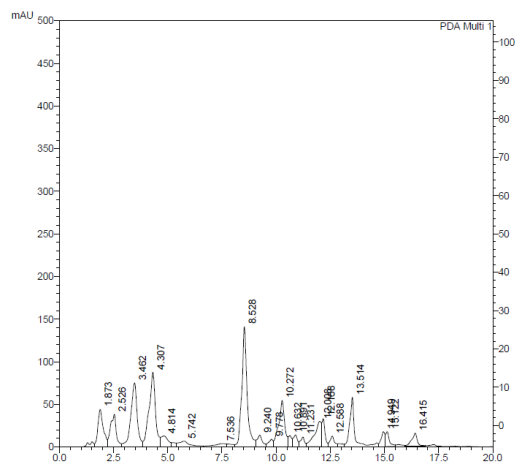


Figura 10. Cromatograma (HPLC) de la harina de *Jatropa curcas* no tóxica a 280nm

Teniendo en cuenta que las alturas de los picos en el cromatograma son proporcionales a la concentración del compuesto detectado, se tomó la muestra que reportara la mayor altura en el pico asignado al factor analizado como la muestra referencia con mayor contenido de ésteres de forbol y a partir de ella se determinó el porcentaje contenido del factor en las demás muestras para la construcción de la gráfica comparativa de los tratamientos efectuados en ambas variedades de *Jatropa curcas*.

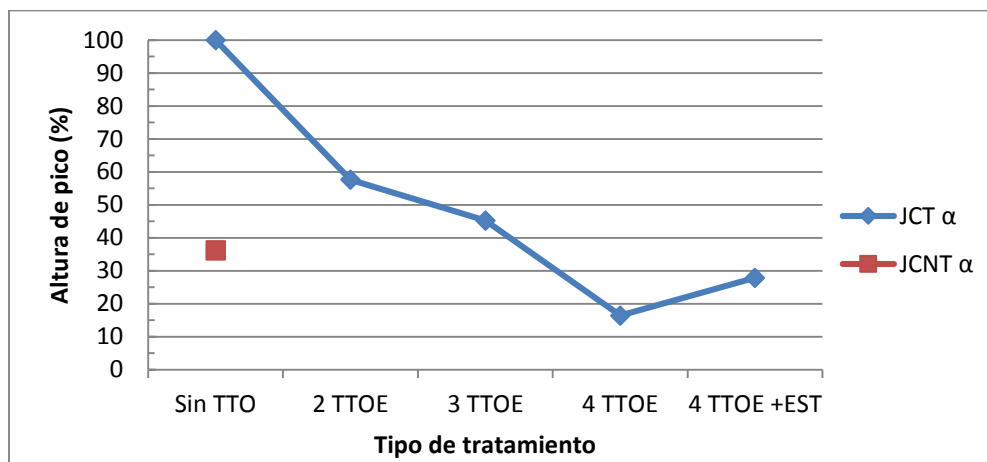


Figura 11. Comparación entre tratamientos de detoxificación de harinas de *Jatropha curcas* tóxica y no tóxica

La mayor reducción para el factor α se presentó en la harina tratada con 4 lavados de etanol incluyendo el tratamiento térmico con una disminución de 83,58%, Por otro lado, se encontró que la reducción del factor en la harina con 4 lavados con etanol y estabilización fue de 74,14% la harina de *Jatropha curcas* no tóxica contiene 63,81% menos ésteres de forbol que la harina tóxica.

6.10 Características del producto final

Tabla 35. Análisis proximal de harina de Jc con tratamiento de detoxificación

Variable	promedio	Base libre de lípidos	Ref. ²¹	Diferencia
% Humedad	3,91±1,02	4,70	10,3	5,6
% Lípidos	17,20±2,84	-	-	-
% Proteína	20,37±1,94	24,60	52,6	28,0
% Cenizas	8,06±0,86	9,73	8,7	-1,0
% Fibra	50,46	60,97	---	---

²¹ (López, 2008) comparada con la torta de *Jatropha curcas* sometida a tratamiento químico con etanol.

La harina de Jc analizada presenta un dato de proteína muy por debajo de lo esperado comparado con el dato de referencia para la *Jatropha curcas* detoxificada por el mismo método con un 28% de diferencia. Sin embargo, este fenómeno se presentó en todas las fases del proceso donde se analizó el contenido de proteína, representando un factor negativo para las procedencias de las harinas analizadas.

Al comparar la harina de *Jatropha curcas* procesada, con alimentos seleccionados reportados por la FAO como se muestra en la tabla 36, se puede ver que el contenido de proteína para la harina de *Jatropha curcas* procesada y analizada (en base libre de lípidos) es sólo menor al compararse con la soya y el maní, lo que permite establecer que aunque la harina estudiada no tuvo las características esperadas con respecto al contenido de proteína reportado, ésta aún se puede considerar como un suplemento en dietas alimentarias con alto contenido proteico.

Tabla 36. Contenido de proteína en alimentos seleccionados

Alimento	% Proteína	% Diferencia para Jc
Frijoles	23,6	1
Arvejas	23,5	1,1
Yuca	1,2	23,4
Maíz	5	19,6
Soya	40	-15,4
Maní	25,8	-1,2
Marañón	20	4,6
Sésamo	20	4,6
Semilla de girasol	23	1,6
Carne de res	22	2,6
Carne de cerdo	22	2,6
Pollo	19	5,6
Leche de vaca entera	3,3	21,3
Huevos frescos	12,1	12,5

(Latham, 2002)

6.11 Variación de características de *Jatropha curcas* durante el estudio.

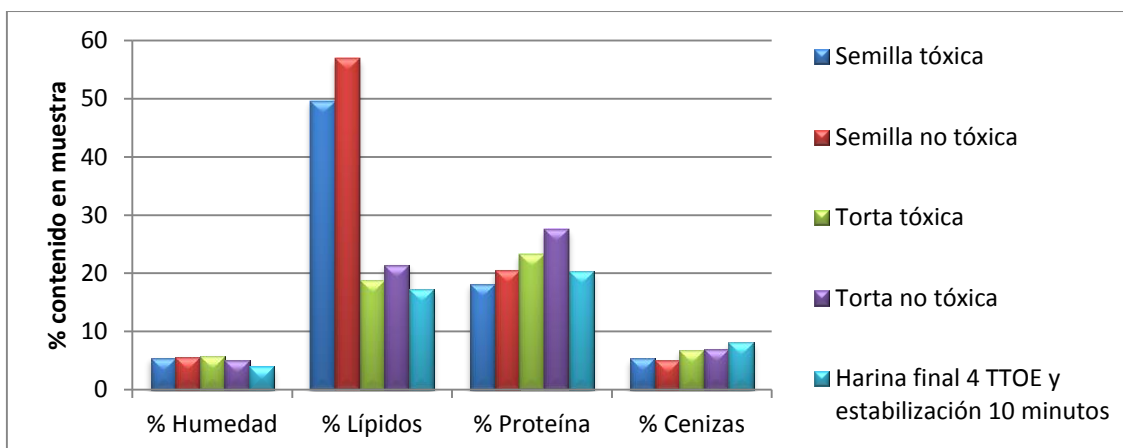


Figura 12. Compilado de análisis proximales realizados en distintas fases del proceso a ambas variedades de semilla de *Jatropha curcas*

De la gráfica anterior, se observa que la humedad se presenta como una variable con una ligera disminución a medida que avanza el procesamiento de la harina, contrario al contenido de cenizas que presenta un ligero aumento. El contenido de lípidos, como ya se observó anteriormente, se presenta con un porcentaje mayor en la semilla de Jc no tóxica y el menor contenido se presenta en la harina procesada. Sin embargo, las tortas de ambas variedades y la harina final presentan un alto contenido de lípidos que puede disminuir la calidad de la harina debido a que hay mayor probabilidad de deterioro por producción de ácidos grasos libres, además de incurrir en pérdidas en la producción de aceite para su transformación a biodiesel. El contenido de proteína en todos los casos analizados, a pesar de ser menor que los datos de referencia, se nota que no hay gran variación con respecto a las fases del proceso, aunque se rescata que la torta de semilla de Jc no tóxica es la que presenta un mayor contenido de proteína.

6.12 Producción de biodiesel a partir de aceite de *Jatropha curcas*

Tabla 37. Metil ésteres identificados con mayor presencia en biodiesel de JcO por espectrometría de masas adaptada a cromatografía de gases

No. pico	Compuesto	% área relativa	Ref. ²²
4	Metil miristato	0,18	0,10
5	Metil palmitoleato	0,68	1,10
6	Metil palmitato	12,21	14,96
9,14,16	Metil oleato	76,82	32,49
10,18	Metil estearato	7,91	3,85
11,13	Metil linoleato	0,10	47,43

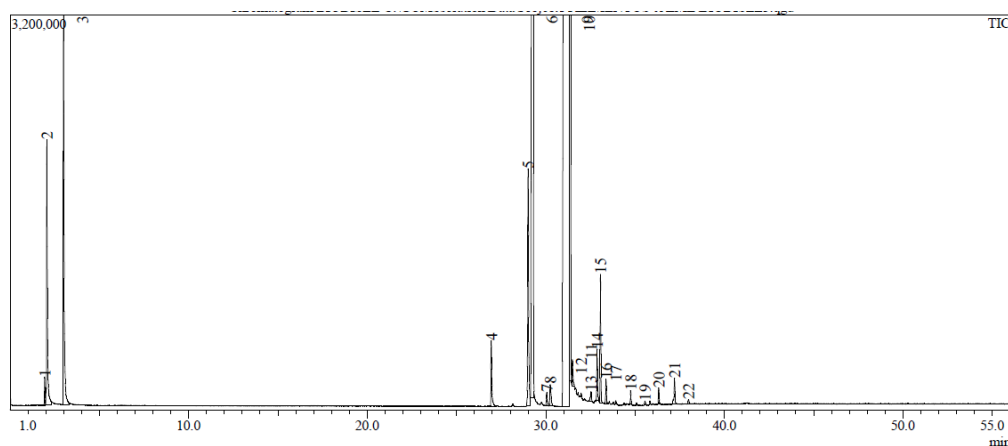


Figura 13. Cromatograma de metil ésteres presentes en biodiesel de JcO

Según la anterior tabla, sumando los porcentajes de las áreas relativas correspondientes a los ésteres metílicos identificados en el análisis de espectrometría de masas adaptada a cromatografía de gases, se encontró que el 97,90% de la muestra corresponde a biodiesel, el porcentaje restante se refieren a

²² (Berchmans et al 2007)

otros ésteres de metilo con baja concentración, restos de glicerina y en menor medida, a reactivos que no participaron en la reacción. El rendimiento de biodiesel obtenido con respecto a la masa inicial de JcO fue 68,6%.

La manera de aumentar el porcentaje de concentración de los ésteres metílicos, es lavar el biodiesel obtenido con una solución de agua y ácido fosfórico o con lavados sucesivos de agua caliente hasta alcanzar pH neutro y secando el biodiesel a 100°C al vacío.

6.13 Descripción de proceso para el aprovechamiento integral de la semilla *Jatropha curcas*

Basado en los resultados obtenidos en este trabajo, 10kg de semilla de *Jatropha curcas* son pelados manualmente obteniendo 6,7kg de núcleo de semilla, el cual es molido y calentado hasta alcanzar 60°C para realizar la extracción de aceite por medio de prensa hidráulica aplicando una presión de 2500 psi donde se obtienen 2,4kg de aceite y 4,3kg de torta. La torta es posteriormente llevada a un molino de cuchillas y clasificada empleando un tamiz No. 40 con abertura de 0,425µm. Posteriormente, se realiza el tratamiento térmico realizando tres (3) lavados sucesivos con agua destilada a 40°C conservando una proporción 1:2 de harina:agua en volumen. Luego a la torta lavada y filtrada, se le agrega agua destilada en proporción 1:1,5 de harina:agua en volumen y se lleva a cocción en horno a 120°C por 1,5 horas. Se deja secar en el horno a 100°C hasta alcanzar peso constante y se muele nuevamente para aplicar el tratamiento químico realizando 4 lavados sucesivos con etanol al 96% conservando proporción 1:10 de harina:etanol en volumen para cada uno de los lavados. Posteriormente, la harina lavada con etanol y filtrada se dirige al horno por 30 minutos a 80°C. Los 3,7kg recolectados de harina que debe ser molida para exponerse en la autoclave al vapor a 121°C por 10 minutos para obtener la harina final de *Jatropha curcas* con un 83% menos de ésteres de forbol con respecto al contenido inicial.

Los 2,4kg de aceite obtenidos de la extracción se lavan con agua a 90°C y se seca a 100°C al vacío. Luego se calienta en el rotaevaporador a 50°C. Aparte, se mezclan 2,13 l de MeOH y 13 ml de H₂SO₄ y se agregan al aceite previamente calentado. Se deja transcurrir una hora manteniendo la temperatura y 145rpm. Luego se lleva la solución obtenida a un embudo separador durante 20 horas, obteniendo una fase acuosa que se desecha (superior) y 3,7kg de una oleosa (inferior) que se calienta a 65°C. Aparte se mezclan en constante agitación 3,6 g de NaOH y 0,73 l de MeOH hasta alcanzar una solución homogénea que es adicionada a la fase oleosa previamente calentada y se deja reaccionar por 2 horas. Al terminar se lleva la solución obtenida al embudo separador por 48 horas, donde se obtienen dos fases, la correspondiente a biodiesel 1,7 kg (superior) equivalentes a 2,14 l y 0,68 kg de glicerina (inferior).

A continuación se presenta el diagrama de bloques para el aprovechamiento integral de la semilla de *Jatropha curcas* como resultado de los análisis descritos en este documento.

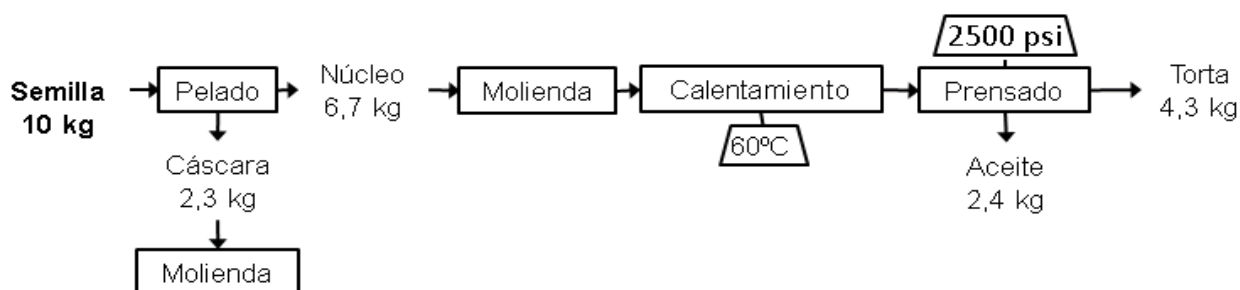


Figura 14. Diagrama de Bloques para el pretratamiento de la semilla de *Jatropha curcas* y la obtención de aceite y torta

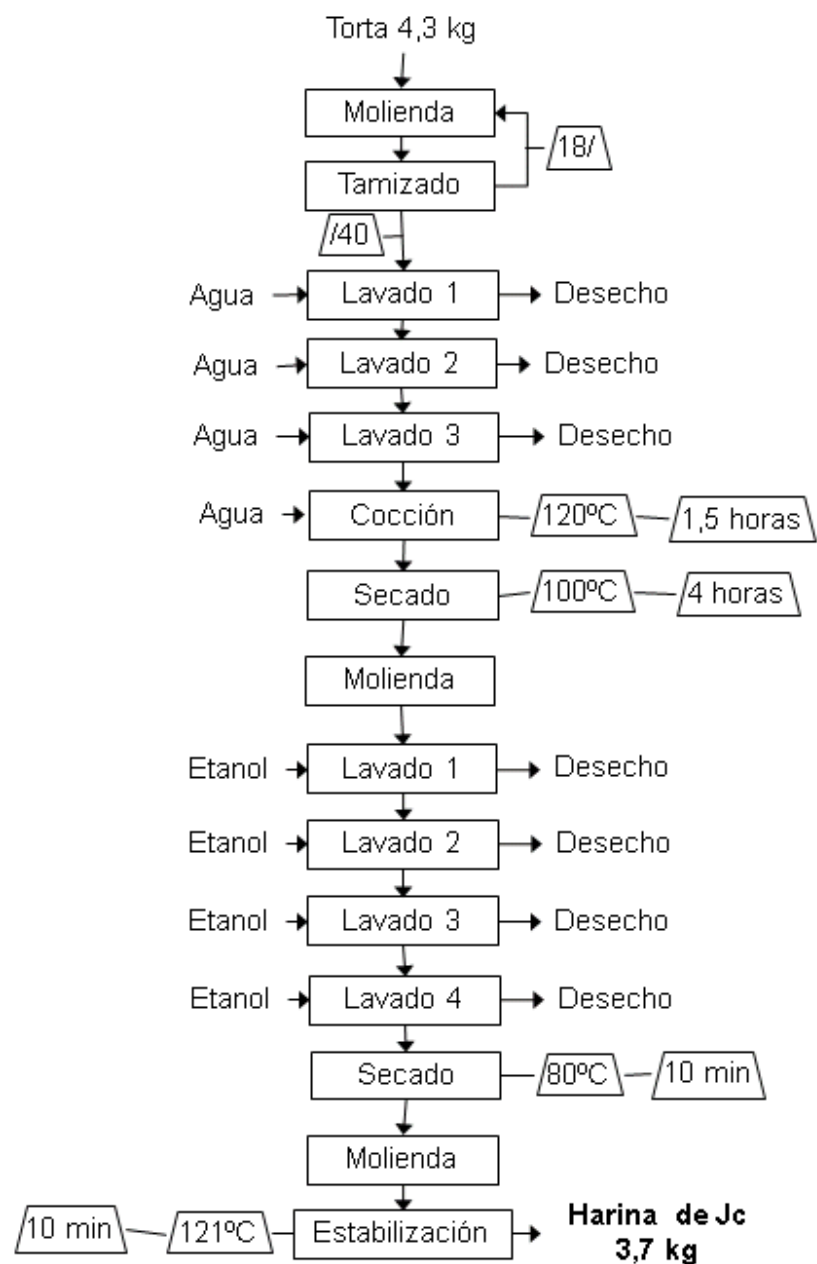


Figura 15. Diagrama de Bloques para la obtención de harina de *Jatropha curcas* detoxificada y estabilizada.

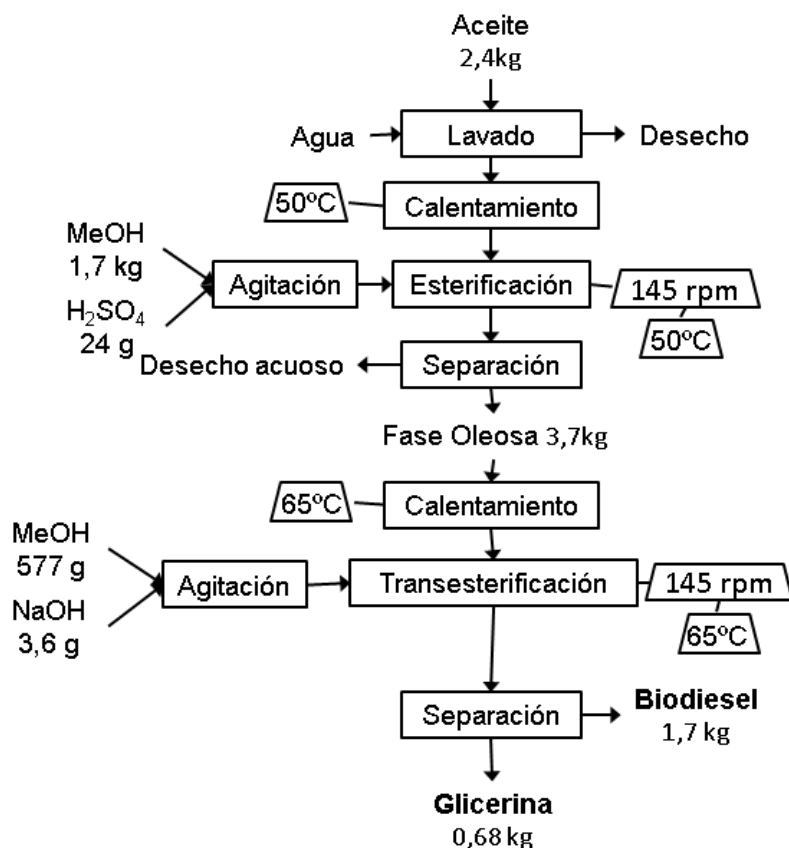


Figura 16. Diagrama de bloques para la obtención de biodiesel y glicerina de *Jatropha curcas*

6.14 Uso potencial de harina de *Jatropha curcas* para alimento de animales

En la tabla 38 se detalla la proteína bruta requerida en g/kg de alimento seco en la dieta diaria típica y cuantos gramos de harina de *Jatropha curcas* procesada y analizada sería requerida para suplir las necesidades de los animales seleccionados si su dieta típica fuera reemplazada en su totalidad por harina de *Jatropha curcas* procesada. En donde se puede observar que para peces con bajo requerimiento proteico, vacas para carne, cerdos y pollos se puede suministrar una cantidad de harina de *Jatropha curcas* procesada menor que la cantidad de alimento típico sin alterar el contenido de proteína bruta en la dieta.

Tabla 38. Proteína bruta requerida en alimentación diaria de varios animales.

Animal	Proteína requerida (g/kg_{alimento seco})	Ref.	Proteína en Jc (g/kg_{harina JC seca})	g de harina de Jc requerida
Peces	200-500	(Tacon, 1989)	204	814-2033
Camarón	300-550		204	1220-2236
Vacas lecheras (450-650 kg)	400-520	(Gasque, 2008)	204	1626-2114
Vacas para carne (300- 500 kg)	100-170	(Requerimientos nutricionales 1984)	204	407-692
Vacas para carne (500- 700 kg)	80-130		204	326-528
Cerdos en crecimiento	130-270	(García- Contreras et al, 2012)	204	529-1098
Cerdos adultos	100-200		204	407-814
Pollos (0-3 semanas)	230	(Ravindran, 2009)	204	935
Pollos (3-6 semanas)	200		204	813
Pollos (6-8 semanas)	180		204	732
Gallinas ponedoras	150		204	610

7. CONCLUSIONES

- I. Para la variedad de *Jatropha curcas* tóxica se obtuvo 67% de rendimiento de pelado manual y 0,8% de pérdidas, mientras para la variedad no tóxica, se presentó 46% de rendimiento de pelado y 22% de pérdida debido a los lavados necesarios para eliminar el fungicida.
- II. La semilla de *Jatropha curcas* de variedad tóxica presentó 50% lípidos y 18% proteína mientras que la variedad no tóxica presentó 57% lípidos y 21% proteína.
- III. La máxima eficiencia de extracción de aceite por medio de prensa hidráulica se presentó para la semilla molida y precalentada a 60°C, alcanzando una extracción de 63% respecto al aceite contenido en la semilla de *Jatropha curcas* no tóxica.
- IV. Para la extracción de aceite de semilla de *Jatropha curcas* por prensa hidráulica se encontró que no necesariamente a mayor temperatura de precalentamiento se obtiene la máxima eficiencia pero para un menor tamaño de partícula si existe un aumento de eficiencia de extracción.
- V. Los aceites provenientes de las variedades analizadas presentaron igual proporción de ácidos grasos saturados e insaturados. Sin embargo, la distribución de los insaturados presentaron diferencias con 36% y 47% para monoinsaturados y 44% y 33% para los poliinsaturados para las variedades tóxica y no tóxica respectivamente. Así mismo se presentan diferencias en la distribución de los poliinsaturados con 34% y 45% para el oleico y 43% y 32% para el linoléico para para las variedades tóxica y no tóxica respectivamente.
- VI. El aceite de *Jatropha curcas* no tóxico se presentó como la mejor opción para producción de biodiesel con un índice de yodo de 99 y un mayor contenido de ácidos grasos monoinsaturados con respecto a la variedad tóxica, con un 47%.

- VII. Se tomó la muestra de la torta de *Jatropha curcas* tóxica sin tratamiento como la muestra referencia por ser la que mayor concentración presentó del factor analizado y aproximado a los ésteres de forbol.
- VIII. La torta de *Jatropha curcas* no tóxica presentó 63,8% menor contenido de ésteres de forbol que la considerada tóxica.
- IX. El mejor tratamiento para la detoxificación fue el de cuatro lavados con etanol incluyendo el tratamiento térmico con una reducción del 83,6% con respecto al contenido inicial.
- X. La harina procesada y analizada presentó un contenido de proteína de 20% (24% en base libre de lípidos) siendo en un 28% menor al reportado en la bibliografía.
- XI. El biodiesel producido presentó un contenido de metil ésteres de 97,9% y un 68,6% de rendimiento con respecto a la masa inicial de aceite.
- XII. La harina de *Jatropha curcas* procesada se presentó como una alternativa alimenticia para peces con bajo requerimiento proteico, vacas para carne, cerdos y pollos suministrando una cantidad de harina de *Jatropha curcas* procesada menor que la cantidad de alimento típico sin alterar el contenido de proteína bruta en la dieta.

8. RECOMENDACIONES

- I. Evaluar los potenciales usos de los residuos resultantes de los lavados de la torta de *Jatropha curcas* con etanol durante el procedimiento de detoxificación.
- II. Analizar toxicidad producida por los ésteres de forbol contenidos en la semilla de *Jatropha curcas* con la utilización de un estándar.
- III. Evaluar las características de la cubierta de semilla de *Jatropha curcas* para la utilización como fertilizante y combustible.
- IV. Estudiar el uso del aceite de semilla de *Jatropha curcas* en alimentos según las variedades analizadas para los diferentes niveles de toxicidad.
- V. Realizar un análisis granulométrico posterior a la molienda de la harina tratada de *Jatropha curcas*.
- VI. El contenido de lípidos la harina procesada y analizada fue muy alto con un 17% por lo que se hace necesario implementar el método combinado prensa-solvente para la optimización de la extracción.
- VII. Realizar el estudio de estabilización para periodos de tiempo superiores de los 23 días analizados.
- VIII. Realizar un estudio completo sobre variables que influyen en la pérdida de proteína bruta y demás variables importantes para la utilización de *Jatropha curcas* a lo largo del proceso y durante etapa de cultivo.
- IX. Implementar el proceso descrito para el aprovechamiento integral de la semilla de *Jatropha curcas* y llevarlo a escala de planta piloto.
- X. Encontrar nuevos usos potenciales de la harina de *Jatropha curcas* en alimentos y como fertilizante.
- XI. Realizar una investigación de alimentación con *Jatropha curcas* en animales a diferentes concentraciones de ésteres de forbol y evaluar su efecto en distintas generaciones.
- XII. Realizar el lavado del biodiesel y caracterizarlo.

9. BIBLIOGRAFÍA

Akbar. E., Yaakob. Z., Kartom. S., Ismail. M. and Salimon. J. Characteristic and Composition of *Jatropha Curcas* Oil Seed from Malaysia and its Potential as Biodiesel Feedstock. European Journal of Scientific Research. Vol 29. No. 3. Malaysia. 2009

Akintayo. E. Characteristics and composition of *Parkia Biglobossa* and *Jatropha curcas* oils and cakes. Bioresource Technology. Vol. 92. Nigeria. 2004

Aregheore. E. M., Becker. K. and Makkar H.P.S. Detoxification of a toxic variety of *Jatropha curcas* using heat and chemical treatments, and preliminary nutritional evaluation with rats. South Pacific Journal of Natural Science. Alemania. 2004

Arias. N. Caracterización fisicoquímica de la pulpa de aguaje (*Mauritia flexuosa*), Estimación de su capacidad antioxidante y su valor nutricional. Universidad del Valle. Colombia. 2013

Becker, K., Makkar, H. P. S., Toxic effects of phorbol esters in carp (*Cyprinus carpio* L.) Vet. Human Toxicol. Alemania. 1998.

Belém. S, Mendonça. S e Galvêas. B. Substâncias Tóxicas, Alergênicas e Antinutricionais Presentes no Pinhão-mansão e seus Derivados e Procedimentos Adequados ao Manuseio. Circular Técnica. Brasil. 2009.

Berchmans, H. J., Hirata, S. Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. Bioresource Technology. Vol. 99. Japón. 2008.

Berry, E. W. An eocene tropical forest in the Peruvian desert. Proceedings of the National Academy of Sciences. USA. 1929.

Carrillo. L, et al. Manual de Microbiología de los Alimentos. Capítulo 8. Harinas y granos. Argentina. 2007.

Colbio: Piñón (*Jatropha curcas* L.) Materiales no tóxicos, De Bajo Porte y Alta Productividad. Colombiana de Biocombustibles. Colbio. Colombia. 2012.

Colbio: Palacios Carlos. Teléfono: (4) 8513333. Celular 314 700 2300. E-mail: colbio@colbio.com Colombia. 2014

datateca.unad.edu.co/contenidos/211615/Modulo_exe/211615_Mexe/indice_de_contenido.html visitada 24 de abril de 2014

depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/AlimentosricosenlipidosyDeterioro_8074.pdf

Iturbe, F. Identificación de grasas y aceites. Departamento de alimentos y biotecnología. UNAM. Visitada 15 de abril de 2014.

Devappa. R.K., Bingham. J., Khanal. S.K. High performance liquid chromatography method for rapid quantification of phorbol esters in *Jatropha curcas* seed. Industrial Crops and Products. Vol 49. Estados Unidos. 2013

FAO: *Jatropha*: A Smallholder Bioenergy Crop. The Potential for Pro-Poor Development. FAO Vol. 8. 2010

Gasque. R: Enciclopedia bovina. Alimentación de bovinos. Facultad de medicina veterinaria y zootecnia. UNAM. México. 2008

Garay. R., Hidalgo. E., Alegría. J. y Mendieta. O. Determinación de Periodos Fisiológicos en la Maduración y Calidad del Aceite de Piñón Blanco (*Jatropha curcas*). Información Tecnológica. Vol 23. No. 4. Perú. 2012.

García-Contreras A, De Loera. Y, Yagüe. A, Guevara. J y García. C. Alimentación práctica del cerdo. Revista Complutense de Ciencias Veterinarias. Vol. 6. No. 1. México. 2012.

Goel, G., H. Makkar, G. Francis y K. Becker. Phorbol esters: structure, biological activity and toxicity in animals. International Journal of Toxicology. Alemania. 2007.

Haas. W., Mittelbach. M, Detoxification experiments with the seed oil from *Jatropha curcas* L. Industrial Crops and Products. Vol. 12. Austria. 2000.

Haas. W., Sterk. H. and Mittelbach. M. Novel 12-Deoxy-16-hydroxyphorbol Diesters Isolated from the Seed Oil of *Jatropha curcas*. Journal of Natural Products. Vol 65. Austria. 2002.

Heller, J. Physics nut *Jatropha curcas* L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 1. Institute of Plants Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben, International Plant Genetic Resources Institute. Italia. 1996

Highina. B. K., Bugaje. I. M. and Umar. B. Biodiesel production from *Jatropha caucous* oil in a batch reactor using zinc oxide as catalyst. Journal of Petroleum Technology and Alternative Fuels. Vol. 2. No. 9. Nigeria. 2011.

Huerga. R. Producción de biodiesel a partir de cultivos alternativos: Experiencia con *Jatropha curcas*. Tesis. Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica (INCAPE) Dependiente de la Universidad Nacional del Litoral (UNL) y del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina. 2010.

Igbinosa. O. O., Igbinosa. E. O. and Aiyegoro. O. A. Antimicrobial activity and phytochemical screening of stem bark extracts from *Jatropha curcas* (Linn). African Journal of Pharmacy and Pharmacology Vol. 3(2). Sur África. 2009

King. A., He. W., Cuevas. J, Freudenberger. M, Ramiamanana. D and Graham. A. Potential of *Jatropha curcas* as a source of renewable oil and animal feed. Journal of Experimental Botany. Vol. 60, No. 10. Inglaterra 2009

Latham, M. Nutrición Humana En El Mundo En Desarrollo. Colección FAO: Alimentación y nutrición No. 29. Italia. 2002.

López, P. Alternativa para la detoxificación de tortas de *Jatropha curcas* I a escala laboratorio para su empleo en alimentación animal. Universidad Eafit. Colombia. 2008.

Lozano, J., Segura. A. y Fernández. A. Capítulo 7. Composición del aceite de oliva. Tesoro de Andalucía. Volumen: Aceite de oliva. España. 2009

Makkar, HPS, Aderibigbe A. O, Becker K. Comparative evaluation of non-toxic and toxic varieties of *Jatropha curcas* for chemical composition, digestibility, protein degradability and toxic factors. Food Chemistry. Alemania. 1998.

Makkar. H, Maes. J, De Grey. W, Becker. K. Removal and Degradation of Phorbol Esters during Pre-treatment and Trans-esterification of *Jatropha curcas* Oil. J. Am. Oil Chem. Soc. Alemania. 2009.

Martínez-Herrera, J., Siddhuraju P., Francis, G., Dávila-Ortíz, G., Becker. K. Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effects of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. Food Chemistry. Vol. 96. Alemania. 2006.

Matsuse. I.T., Lim. Y.A., Hattori. M., Correa. M. and Gupta. M. P. A search for anti-viral properties in Panamanian medicinal plants. The effects on HIV and its essential enzymes. Journal of Ethnopharmacology 64. Panamá. 1999

Megumi. M, et al. Bio-Detoxification of *Jatropha* Seed Cake and Its Use in Animal Feed. Capítulo 11. Biodiesel – Feed stocks, Production and Applications. 2013

Palacio, Carlos A. PIÑON (*Jatropha curcas* L.) Colombiana de Biocombustibles. Colombia. 2012

Quimbayo, Aida. El uso actual del cultivo de la *Jatropha curcas* I. en sistemas agroforestales y silvopastoriles y su potencial para contribuir al desarrollo social y

económico de un cultivo en expansión mundial. Corporación colombiana de investigación agropecuaria. Colombia. 2010

Ravindran. V. Disponibilidad de piensos y nutrición de aves de corral en países en desarrollo. FAO Revisión del desarrollo avícola. Nueva Zelanda. 2009

Restrepo, J. Manual de prácticas de análisis de alimentos. Facultad de Ciencias Naturales y Exactas. Departamento de Química. Universidad del Valle. Colombia. 1994.

Requerimientos Nutricionales de Ganado Productor de Carne. Archivos del productor del ganado de carne. Comité de Recursos de Ganado Productor de Carne del Oeste de Estados Unidos. 6ta. Edición Revisada por la Academia Nacional de Ciencia. Estados Unidos. 1984

Soerawidjaja T. H. Potential of *Jatropha curcas* L. as a non-edible feed stock of biodiesel fuel. 7th Biomass-Asia Workshop; Indonesia. 2010.

Sotolongo. J. *Jatropha curcas* L. As a source for the production of biodiesel: a cuban experience. Cuba. 2002.

Tacon. A. Nutricion Y Alimentacion De Peces Y Camarones Cultivados Manual De Capacacitacion. Organizacion de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Brasil. 1989.

Torres, Carlos. Ficha técnica de la *Jatropha curcas*. Cultivos Energéticos S.R.L., Argentina. 2007

Wakandigara, A. Nhamo, L. R. M. and Kugara, J. Chemistry of Phorbol Ester Toxicity in *Jatropha curcas* Seed – a Review. International Journal of Biochemistry Research & Review. Zimbabwe. 2013

World Wide Fund for Nature. WWF. Global Market Study on Jatropha. Final Report. Inglaterra y Alemania. 2008

www.jatrosolutions.com visitada 13 de noviembre de 2013

www.jatropha.es/suaceite.htm visitada 4 de abril de 2014

www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/13985/14932

Caracterización morfofisiológica de *Jatropha curcas* L. variedad Brasil cultivada en dos zonas de Colombia. visitada 4 de abril de 2014