



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

“EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ACEITE DE HIGUERILLA
(*Ricinus communis* L.) EN ZONAS ÓPTIMAS Y NO ÓPTIMAS DE
IMBABURA PARA OBTENER BIODIESEL B5”

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniería en Energías Renovables

AUTORA: Margoth Elizabeth Paucar de la Cruz

Director: Ing. Juan Carlos García Montoya PhD

Ibarra-Ecuador

2020



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES

**CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Ibarra, 30 de Julio del 2020

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: "EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ACEITE DE HIGUERILLA (*Ricinus communis* L.) EN ZONAS ÓPTIMAS Y NO ÓPTIMAS DE IMBABURA PARA OBTENER BIODIESEL B5", de autoría de la señorita Margoth Elizabeth Paucar de la Cruz estudiante de la Carrera de **INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES** el tribunal tutor **CERTIFICAMOS** que la autora ha procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

TRIBUNAL TUTOR

FIRMA

PhD. Juan Carlos García
DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN

MSc. Hugo Paredes
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN

MSc. Carlos Mafla
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN

Misión Institucional:

Contribuir al desarrollo educativo, científico, tecnológico, socioeconómico y cultural de la región norte del país. Formar profesionales críticos, humanistas y éticos comprometidos con el cambio social.

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte de manera digital para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

| DATOS DE CONTACTO | | |
|--------------------------|--|------------|
| CÉDULA: | 040150866-8 | |
| NOMBRES Y APELLIDOS: | Margoth Elizabeth Paucar De La Cruz | |
| DIRECCIÓN: | Redondel Ajaví (Victor Manuel Guzmán y Manuel Terán Monje) | |
| EMAIL: | elipdelacruz@gmail.com | |
| TELEFONO FIJO Y MOVIL: | 2236067 | 0985548565 |

| DATOS DE LA OBRA | | |
|--|---|-----------------------------------|
| TÍTULO: | EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ACEITE DE HIGUERILLA (<i>Ricinus communis</i> L.) EN ZONAS ÓPTIMAS Y NO ÓPTIMAS DE IMBABURA PARA OBTENER BIODIESEL B5. | |
| AUTOR: | Margoth Elizabeth Paucar De La Cruz | |
| FECHA: | 30 de Julio 2020 | |
| SOLO PARA TRABAJO DE TITULACIÓN | | |
| PROGRAMA: | <input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO | <input type="checkbox"/> POSGRADO |
| TÍTULO POR EL QUE OPTA: | Ingeniera en Energías Renovables | |
| DIRECTOR: | Ing. Juan Carlos García Montoya PhD | |



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

UNIVERSIDAD ACREDITADA RESOLUCIÓN NRO. 001-073-CEAACES-2013-13
Ibarra-Ecuador

2. CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrollo sin violar derechos de autores terceros, por lo tanto, la obra es original y es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 30 de días de Julio 2020

AUTORA

Paucar De La Cruz Margoth Elizabeth
C.I. 040150866-8

AGRADECIMIENTO

*A mi director del trabajo de titulación **Dr. Juan Carlos García**, por compartirme sus conocimientos, dedicación y asesoramiento en el desarrollo de mi tesis. Sobre todo, gracias por la paciencia y consejos impartidos durante mi formación académica.*

*A mis asesores **MsC. Carlos Mafla** y **MsC. Hugo Paredes**, por el tiempo invertido en la revisión de la tesis. También, gracias por sus comentarios y sugerencias que me ayudaron para mejor redacción y presentación del documento.*

*Mi agradecimiento eterno a mi **Universidad Técnica del Norte**, por permitirme formar parte de ella y abrirme las puertas para poder estudiar mi carrera.*

*A mis profesores de la **FICAYA**, por compartir su sabiduría, entrega y dedicación en mi formación.*

Y para finalizar, agradezco a mis compañeros de carrera y de aula por la amistad desinteresada que construimos durante todos estos años que compartimos juntos, nunca me sentí sola, siempre estuvieron para apoyarme y darme ánimos cuando más los necesité.

Elizabeth Paucar

DEDICATORIA

A mi Dios por las constantes bendiciones que derrama sobre mí, por brindarme la vida y su amor infinito, y por permitirme sonreír ante todos mis logros que son el resultado de su ayuda.

A mis padres Victor y Lucia, por ser mi apoyo incondicional y los principales promotores de mis sueños, siempre me motivaron con sus palabras de ánimo indicándome el camino de superación.

A mis hermanas Irene, Andrea y Lorena, son mi motivo de orgullo y ejemplo por todos sus logros obtenidos y siempre han estado ahí para mí, con el fin de evitarme los errores y problemas que acechan en el camino de la vida.

A mis sobrinas Valentina y Ahinoa, que con sus locuras y alegrías son mi motivación para seguir adelante.

A mi más bello ángel, mi abuelita Rosita (+), que desde el cielo guía e ilumina mi camino.

A mi hermosa familia De La Cruz, por consentirme tanto y confiar en mí, gracias por ser parte de mi vida y por permitirme ser parte de su orgullo. los amo con todo mi corazón.

Finalmente, a todas las personas que formaron parte de mi vida y de una u otra manera estuvieron apoyándome durante mi formación académica.

Elizabeth Paucar

ÍNDICE

| | |
|--|------|
| AGRADECIMIENTO | v |
| DEDICATORIA | vi |
| RESUMEN | xii |
| ABSTRACT | xiii |
| CAPÍTULO I..... | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Problema..... | 3 |
| 1.2. Justificación | 4 |
| 1.3. Objetivos..... | 5 |
| 1.3.1. Objetivo General | 5 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos | 5 |
| 1.4. Pregunta Directriz | 5 |
| CAPÍTULO II..... | 6 |
| MARCO TEÓRICO..... | 6 |
| 2.1. Energía Renovable | 6 |
| 2.2. Biomasa | 7 |
| 2.2.1. Clasificación de la biomasa | 7 |
| 2.3. Biocombustibles..... | 8 |
| 2.3.1. Bioetanol..... | 8 |
| 2.3.2. Biogás..... | 9 |
| 2.3.3. Biodiésel | 9 |
| 2.4 Combustible Diésel | 10 |
| 2.4.1 Combustible diésel en el Ecuador | 10 |
| 2.5. Cultivos energéticos | 11 |
| 2.5.1. Higuera..... | 12 |
| 2.6. Fenología Vegetal | 17 |
| 2.6.1. Fases fenológicas | 17 |
| 2.7. Cosecha | 18 |
| 2.8. Desgrane | 19 |
| 2.9. Contenido de Humedad | 19 |

| | |
|---|----|
| 2.10. Trituración de las Semillas | 20 |
| 2.11. Extracción de Aceite | 21 |
| 2.11.1. Expeller o tornillo extractor | 21 |
| 2.11.2. Extracción por solventes..... | 21 |
| 2.11.3. Extracción con fluido supercrítico | 23 |
| 2.12. Biodiésel | 26 |
| 2.12.1. Compuestos para elaboración de biodiésel..... | 27 |
| 2.12.2. Proceso de elaboración de biodiésel..... | 28 |
| 2.12.3. Cantidad de biodiésel necesario para cubrir el escenario B5 en Imbabura | 30 |
| 2.2. Marco Legal..... | 30 |
| 2.2.1. Decreto Ejecutivo 1303 | 31 |
| CAPÍTULO III | 33 |
| METODOLOGÍA..... | 33 |
| 3.1. Descripción del Área de Estudio..... | 33 |
| 3.1.1. Ubicación Geográfica..... | 33 |
| 3.2. Métodos | 35 |
| 3.2.1. Análisis morfométrico de las semillas de higuera (<i>Ricinus communis</i> L.) provenientes de zonas cultivadas tanto óptimas y no óptimas de la provincia de Imbabura | 35 |
| 3.2.2. Cuantificación el aceite de higuera de las diferentes zonas tanto óptimas como no óptimas de cultivo..... | 43 |
| 3.2.3. Obtención del biodiésel mediante la transesterificación | 46 |
| 3.2.4. Zonificación para el cultivo de higuera..... | 48 |
| 3.3. Materiales y Equipos..... | 51 |
| CAPÍTULO IV | 53 |
| RESULTADOS Y DISCUSIONES..... | 53 |
| 4.1. Análisis morfométrico de las semillas de higuera (<i>Ricinus communis</i> L.) provenientes de zonas cultivadas tanto óptimas y no óptimas de la provincia | 53 |
| 4.1.1. Delimitación del área de estudio..... | 53 |
| 4.1.2 Fenología de las semillas de higuera..... | 55 |
| 4.1.3. Secado..... | 58 |
| 4.1.4. Morfometría de las semillas..... | 59 |

| | |
|--|----|
| 4.2. Cuantificación del aceite de higuera en las diferentes zonas de cultivo, tanto óptimas como no óptimas..... | 60 |
| 4.2.1. Rendimiento de aceite mediante la metodología fluidos supercríticos | 61 |
| 4.2.2. Rendimiento de aceite mediante la metodología con solvente | 62 |
| 4.3. Obtención de biodiésel mediante la transesterificación | 64 |
| CAPÍTULO V | 68 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 68 |
| 5.1. Conclusiones | 68 |
| 5.2 Recomendaciones | 68 |
| BIBLIOGRAFÍA | 70 |
| ANEXOS..... | 85 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 <i>Características típicas del biodiésel y diésel petrolífero</i> | 10 |
| Tabla 2 <i>Ubicación Geográfica del Muestreo</i> | 34 |
| Tabla 3 <i>Ubicación Geográfica del Muestreo</i> | 50 |
| Tabla 4 <i>Materiales y Equipos</i> | 52 |
| Tabla 5 <i>Biomasa total obtenida por zonas</i> | 55 |
| Tabla 6 <i>Biomasa total obtenida</i> | 55 |
| Tabla 7 <i>Datos morfométricos de semillas</i> | 59 |
| Tabla 8 <i>Rendimientos de aceite extraído mediante FSC</i> | 61 |
| Tabla 9 <i>Rendimientos de extracción de aceite con equipo Soxhlet</i> | 63 |
| Tabla 10 <i>Cantidad de biodiésel obtenido mediante la transesterificación</i> | 68 |
| Tabla 11 <i>Producción de biodiésel con respecto a una hectárea de cultivo</i> | 66 |
| Tabla 12 <i>Producción total de aceite y biodiésel (B100) superficie de estudio</i> | 66 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 <i>Ubicación geográfica del área de estudio</i> | 35 |
| Figura 2 <i>Ilustración demostrativa de la delimitación del área de estudio</i> | 36 |
| Figura 3 <i>Delimitación del área de Cultivo de Higuierilla</i> | 37 |
| Figura 4 <i>Fases fenológicas de las semillas de Higuierilla</i> | 38 |
| Figura 5 <i>Recolección de los racimos de Higuierilla</i> | 39 |
| Figura 6 <i>Desgrane de las capsulas de las semillas de Higuierilla</i> | 39 |
| Figura 7 <i>Limpieza de las semillas</i> | 40 |
| Figura 8 <i>Secado de las semillas de Higuierilla</i> | 41 |
| Figura 9 <i>Análisis morfométrico de las semillas</i> | 42 |
| Figura 10 <i>Semillas de Higuierilla colocada en el molino</i> | 42 |
| Figura 11 <i>Diagrama de equipo de extracción con fluido supercrítico</i> | 43 |
| Figura 12 <i>Muestras de extracción con FSC</i> | 44 |
| Figura 13 <i>Extracción de aceite mediante equipo Soxhlet</i> | 46 |
| Figura 14 <i>Determinación de pH del Metóxido de Sodio</i> | 47 |
| Figura 15 <i>Proceso de transesterificación y obtención de biodiésel</i> | 47 |
| Figura 16 <i>Mezcla del 5% B100 con 95% Diésel Premium</i> | 48 |
| Figura 17 <i>Zonas óptimas para el cultivo de Higuierilla</i> | 49 |
| Figura 18 <i>Zonas no óptimas para el cultivo de Higuierilla</i> | 51 |
| Figura 19 <i>Fases del desarrollo de las semillas en las zonas óptimas</i> | 56 |
| Figura 20 <i>Fases del desarrollo de las semillas para las zonas óptimas</i> | 57 |
| Figura 21 <i>Curva de secado de las semillas de Higuierilla</i> | 58 |
| Figura 22 <i>Morfometría de las semillas de Higuierilla</i> | 60 |
| Figura 23 <i>Rendimientos de aceite mediante la metodología FSC</i> | 62 |
| Figura 24 <i>Rendimientos de aceite mediante la metodología Soxhlet</i> | 63 |
| Figura 25 <i>Comparación de metodologías aplicadas en la obtención de aceite</i> | 64 |
| Figura 26 <i>Obtención de rendimientos de biodiesel mediante la transesterificación</i> .. | 65 |

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ACEITE DE HIGUERILLA (*Ricinus communis* L.) EN ZONAS ÓPTIMAS Y NO ÓPTIMAS DE IMBABURA PARA OBTENER BIODIESEL B5

Nombre del estudiante: Margoth Elizabeth Paucar De La Cruz

RESUMEN

La continua alza en los precios de los combustibles fósiles y la contaminación ambiental producto de los gases de efecto invernadero provocados por el uso de éstos, ha motivado a la búsqueda de nuevas fuentes alternativas de combustión, que ofrezcan mayor independencia energética y sean más amigable con el ambiente. Una alternativa es el cultivo de especies con potencial bioenergético, como es el caso de la higuierilla (*Ricinus communis* L.), de la cual es posible elaborar biodiésel a partir del aceite de sus semillas. Por lo tanto, la provincia de Imbabura, cuenta con un alto potencial para explotar dicho cultivo debido a sus favorables condiciones climáticas y edafológicas. En este trabajo se evaluó el rendimiento de aceite de *Ricinus communis* L en zonas óptimas y no óptimas de la provincia para elaborar biodiésel B5; para ello, inicialmente se realizó el análisis morfoométrico de las semillas tomando en cuenta las variables del ancho, grosor y largo. Posteriormente, se llevó a cabo la extracción del aceite mediante fluidos supercríticos utilizando como solvente CO₂, bajo diferentes condiciones de presión y temperatura de 400 bar y 80°C respectivamente, obteniendo un mayor rendimiento de aceite de 2.51%. También, se extrajo aceite por Soxhlet, usando Hexano como solvente orgánico, dando un rendimiento de 19.06 %. Finalmente, se realizó la transesterificación a un rango de temperatura entre 40-50°C, empleando hidróxido de sodio (NaOH) como catalizador y metanol (CH₃OH) como disolvente, el rendimiento de la reacción obtenido fué del 94.7%. Concluyendo que, el rendimiento de semillas total en las zonas óptimas fue de 135.9 kg/ha con una producción de aceite de 0.019 tn/ha y 16.17 l/ha de biodiésel. Así mismo, para las zonas no óptimas se obtuvo 76.80 kg/ha de semillas, 0.011 tn/ha de aceite extraído y 9.13 l/ha de biodiésel de higuierilla.

Palabras clave: Aceite de Higuierilla, Fluidos Supercríticos, Equipo Soxhlet, Transesterificación, Biodiésel.

EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF HIGUERILLA OIL (*Ricinus communis* L.) IN OPTIMAL AND NON OPTIMAL ZONES IN IMBABURA TO OBTAIN BIODIESEL B5

ABSTRACT

The continuous rise in the prices of fossil fuels and the environmental pollution caused by the greenhouse gases caused by their use have motivated the search for new alternative sources of combustion, which offer greater energy independence and are friendlier with the environment. An alternative is the cultivation of species with bioenergetic potential, such as the castor (*Ricinus communis* L.), from which it is possible to make biodiesel from the oil of its seeds. Therefore, the province of Imbabura has a high potential to exploit this crop due to its favorable climatic and soil conditions. This work evaluated the performance of *Ricinus communis* L oil in optimal and non-optimal areas of the province to make B5 biodiesel; For this, the morphometric analysis of the seeds was initially carried out taking into account the variables of width, thickness and length. Subsequently, the extraction of the oil was carried out by means of supercritical fluids using CO₂ as the solvent, under different conditions of pressure and temperature of 400 bar and 80 ° C, respectively, obtaining a higher oil yield of 2.51%. Also, oil was extracted by Soxhlet, using Hexane as organic solvent, giving a yield of 19.06%. Finally, transesterification was carried out at a temperature range between 40-50°C, using sodium hydroxide (NaOH) as catalyst and methanol (CH₃OH) as solvent, the reaction yield obtained was 94.7%. Concluding that, the total seed yield in the optimal zones was 135.9 kg / ha with an oil production of 0.019tn / ha and 16.17 l / ha of biodiesel. Likewise, for the non-optimal areas, 76.80 kg / ha seeds, 0.011 tn / ha of extracted oil and 9.13 l / ha of castor biodiesel were obtained.

Key words: Castor oil, Supercritical Fluid, Soxhlet, Transesterification, Biodiesel

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Según la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP, 2018), en el año de 1961 el precio del combustible por barril fue de 1.57 USD. En el año 2018, dicha cifra asciende a aproximadamente 70 dólares por barril, lo que implica un aumento considerable de los precios. En Ecuador el subsidio destinado a los combustibles para el año 2018 es de 1.7 millones de dólares, siendo el 53.4% de totalidad de las subvenciones, ocupado el primer lugar del gasto estatal alrededor de 899.30 millones de dólares (MEF, 2018).

También, el consumo de energía procedente de combustibles fósiles en Ecuador es del 86.85% (Banco Mundial, 2014). Esto quiere decir que hay una predominancia de alto consumo de combustibles fósiles siendo el principal problema de producción de emisiones de gases de efecto invernadero. Entre ellos, el sector transporte, y las industrias de la energía (producción de electricidad y refinamiento de petróleo), las cuales emiten el 79% de las emisiones del sector energía (BID, 2017).

A consecuencia de lo mencionado anteriormente, se ha motivado a la búsqueda de nuevas alternativas de fuentes de combustión, que ofrezcan mayor independencia energética y sean más amigable con el medio ambiente, una alternativa es el cultivo de especies con potencial bioenergético, como es el caso de la higuera (*Ricinus communis* L.), de la cual es posible elaborar biodiésel a partir del aceite de sus semillas (Hincapié et al., 2011).

Por ello, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2011) junto con el Programa Nacional de Biocombustibles de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos (SAGPyA, 2010) mencionan que para Argentina, se presenta condiciones altamente favorables para transformarse en uno de los principales

polos mundiales de producción de biodiésel, esencialmente a partir del aceite de la soja con 13.1% del mercado internacional. Esta situación se asocia a la imposición de un Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles, que establece una mezcla obligatoria de biocombustibles con combustibles fósiles a partir del 01 de enero del año 2010, donde, el gasoil deberá contener como mínimo 7% de biodiésel (Di Paola, 2014). Siendo esta medida beneficiosa para muchos sectores, tanto económico, social y ambiental puesto que, entre tantos otros beneficios, al momento de usar biodiésel en los motores, se está reduciendo emisiones de efecto invernadero de 70% a 90% en comparación con el diésel fósil (FAO, 2008).

Por otra parte, el origen de la higuera (*Ricinus communis* L.) se origina en el Este de África (Etiopía), Noreste y Sureste de Asia y Península Árabe, India, y China (Severino, 2012). Sin embargo, Etiopía es considerado como el lugar de origen más probable debido a la presencia de una gran diversidad (Anjani, K., 2012).

En Ecuador la higuera es un cultivo tradicional, especialmente en la provincia de Manabí, la baja productividad se debe al desconocimiento de las técnicas más adecuadas para manejar el cultivo, el uso de variedades no mejoradas, a la siembra tardía o fuera de época y a la utilización de semillas que poseen características indeseables para servir como tales (Mendoza y Reyes, 2015). En esta provincia existen entre 300 y 500 hectáreas sembradas de higuera en forma de pequeñas parcelas, este producto tiene un sin número de usos de diversas áreas comerciales, por lo tanto, el reto es de impulsar la siembra en más cantones y sobre todo industrializarlo (Velalcázar, 2018).

Finalmente, Imbabura es un lugar idóneo para producir biodiésel a partir de la higuera, cuenta con áreas óptimas para su crecimiento masivo y un mayor rendimiento dependiendo de variables tanto climáticas, como temperatura y precipitación y edáficas como textura, pH, profundidad, y pendiente. Siendo así, una

alternativa para reemplazar gradualmente el diésel a nivel provincial y nacional, específicamente la gran parte de su oferta se destina al consumo del sector transporte (Velalcázar, 2018).

1.1. Problema

Ecuador, refleja una dependencia de los combustibles fósiles del 88% de toda la producción de energía primaria. Además, la creciente preocupación por la continua alza en los precios de los combustibles fósiles y la contaminación ambiental producto de los gases de efecto invernadero provocados por el uso de estos combustibles tradicionales, ha motivado la búsqueda de nuevas alternativas de fuentes de combustión, que ofrezcan mayor independencia energética y sean más amigable con el medio ambiente (BEN, 2016).

El país aún depende en gran medida de los derivados del petróleo para el desarrollo de todos sus sectores, siendo el transporte uno de los más importantes y de mayor consumo, puesto que el 46% de la demanda nacional de energía corresponde a este sector (BEN, 2016). El combustible de mayor consumo es el diésel, fundamentalmente en el transporte pesado, buses, buques y generación termoeléctrica, emitiendo alrededor del 79% de las emisiones del sector energía (BID, 2017). Donde, la demanda interna de derivados en 2016 fue de 94.7 millones de barriles, de esa cantidad, 33.5 millones de barriles correspondieron a diésel, 26.5 millones a gasolina y 12.5 millones a gas licuado de petróleo (GLP) (Petroecuador, 2016). El subsidio destinado a los combustibles para el año 2108 es de 1.7 millones de dólares, lo que representa el 53.4% de totalidad de las subvenciones y dentro de ellas el diésel ocupa el primer lugar del gasto estatal, siendo de 899.30 millones de dólares, según el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF, 2018).

El Estado busca modelos de desarrollo sostenible, donde las energías renovables se convertirán en un pilar fundamental para el avance de todos los sectores estratégicos,

reduciendo de esta manera la necesidad del uso masivo de hidrocarburos. Una de las energías renovables con potencial en el Ecuador es la biomasa, en el año 2016 el país tuvo una alta producción agrícola que constituye el 10.2% del PIB (Banco Mundial, 2017). La producción de biocombustibles y bioelectricidad podría obtenerse de la biomasa que se encuentra en los residuos agrícolas y en cultivos energéticos sostenibles, siempre y cuando no incidan en la cadena alimentaria (Velalcázar, 2018).

En Imbabura, la demanda de biodiésel para el escenario B5, se estimó en 1.58 millones de galones en el 2016 y en proyección para el año 2030 de 2.7 millones de galones. Así mismo, se necesitan alrededor de 9 mil hectáreas de terreno cultivable de higuerrilla (*Ricinus communis* L.) respectivamente (Velalcázar, 2018).

1.2. Justificación

Conforme al lineamiento de cambio de matriz energética estipulado en Ecuador, la necesidad de implementación de nuevas fuentes de energías es una prioridad para el desarrollo económico, y energético del país. Una alternativa son los cultivos bioenergéticos, como es el caso de la higuerrilla (*Ricinus communis* L.), de la cual es posible elaborar biodiésel a partir del aceite de sus semillas, fuentes alternativas que contribuya como uno de los pilares fundamentales para conseguirlo.

Es necesario realizar estudios que permitan determinar cuál es la eficiencia de producción de biodiésel a partir de *Ricinus communis* L, por lo cual permite la creación de datos enfocados a la producción de bioenergía y futuros proyectos a mayor escala, como también promoviendo estudios de este tipo, aumentando la información de datos válidos que cumplan con requisitos de sostenibilidad desde el punto de su viabilidad tecnológica y económica, con perspectiva de largo plazo, como referencia para futuros proyectos dirigidos directamente en la contribución del cambio de la matriz energética y la búsqueda de soluciones sostenibles para la demanda actual de combustibles y electricidad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el rendimiento de aceite del cultivo energético de higuierilla (*Ricinus communis* L.) en las zonas óptimas y no óptimas de la provincia de Imbabura para elaborar biodiésel B5.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Analizar el estudio morfométrico de las semillas de diferente eco tipos de higuierilla provenientes de zonas cultivadas tanto óptimas y no óptimas de la provincia.
- Cuantificar el aceite de higuierilla de las diferentes zonas tanto óptimas como no óptimas de cultivo.
- Elaborar biodiésel B5 mediante el proceso de transesterificación.

1.4. Pregunta Directriz

¿Existe diferencias en rendimientos de aceite de higuierilla (*Ricinus communis* L.) en zonas óptimas y no óptimas del cultivo en la provincia de Imbabura?

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

La revisión de literatura que se muestra a continuación se basa en varios casos de estudio, métodos y técnicas que se han empleado anteriormente para la extracción de aceite a partir de las semillas de higuera y la obtención de biodiésel B5.

2.1. Energía Renovable

Las energías renovables constituyen parte importante de la energía utilizada por la humanidad desde tiempos antes que se inventaran los combustibles fósiles (Salgado, 2010). Por lo tanto, la Asociación de Empresas de Energías Renovables (APPA, 2016), menciona que las energías renovables son aquellas que se obtienen de fuentes naturales inagotables a escala humana, ya que el recurso tiene la capacidad de regenerarse de manera natural.

Por lo tanto, existen varias fuentes renovables que nos permiten satisfacer nuestras necesidades energéticas, sin embargo, entre las más comunes y de mayor interés se encuentran las siguientes:

- Biomasa
- Energía Solar
- Energía Eólica
- Energía Hidráulica
- Energía Geotérmica

2.2. Biomasa

Comprende al grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se originan a partir de la materia orgánica formada por vía biológica (Sardón, 2003). La energía que acumula la biomasa tiene su origen en el sol mediante la fotosíntesis, las plantas toman la energía lumínica del sol (fotones), el dióxido de carbono de la atmósfera, el agua y las sales del suelo, produciendo azúcares (Vicente, 2012).

Bajo la denominación genérica de biomasa se incluye un conjunto muy heterogéneo de materias, tanto por su origen como por su naturaleza. Atendiendo al origen es posible diferenciar, desde un punto de vista ecológico, biomasa de distintos órdenes:

- Biomasa primaria. Es la materia orgánica formada directamente por los seres fotosintéticos.
- Biomasa secundaria. Es producida por los seres heterótrofos que utilizan en su nutrición la biomasa primaria.
- Biomasa terciaria. producida por los seres que se alimentan de biomasa secundaria.

2.2.1. Clasificación de la biomasa

Costa (2013) afirma que existen tres tipos de biocombustibles de acuerdo con su origen:

- Vegetal: tienen su base en las plantas y algas. Algunos ejemplos son la higuera (con la que se produce biodiésel), el miscanthus (con el que se produce etanol), las algas (con la que se producen biodiésel), el maíz (con el que se produce etanol), etc.
- Animal: tienen su origen principalmente en las grasas de animales comúnmente utilizados para la alimentación humana como el pollo, la vaca, entre otros, y siempre producen biodiésel. Se confunde un poco con la biomasa de origen residual, de hecho, muchas veces esa grasa es oriunda de restos del procesamiento de carnes.

- Residual: se originan de residuos que pueden ser animales, vegetales, o incluso de la naturaleza misma, como aguas residuales (empleadas para producir gas metano), restos de fritura de restaurantes (biodiésel), basura (etanol y gas metano), etc.

2.3. Biocombustibles

Son líquidos combustibles producidos a partir de carga de biomasa mediante una serie de procesos químicos. Los biocombustibles más importantes son el biodiesel (aceite vegetal) y el bioetanol y su derivado el éster terciario butil étil (de plantas de azúcar). Pueden sustituir directamente a los combustibles fósiles usados en motores (modificados o no) y usarse en pequeños calefactores, o producir electricidad, con la ventaja de aprovechar las mismas tuberías de los combustibles fósiles y con la ventaja adicional aceptada de que sus emisiones perjudiciales son inferiores a las de dichos combustibles (Creus, 2014).

Los biocarburantes actuales o de primera generación que ya están en el mercado solo se pueden producir de manera sostenible en cantidades limitadas, por competir en usos de la tierra, o en materias primas con los productos alimentarios. En este sentido, deben contemplarse como una etapa de transición hasta el despliegue de tecnologías más evolucionadas (Vicente, 2012).

2.3.1. Bioetanol

Es un biocombustible líquido elaborado a partir de fuentes renovables, se elabora por medio de la fermentación de ciertos alimentos como son: maíz, remolacha, melaza, residuos agrícola y caña de azúcar. Se emplea como combustible para motores de combustión interna ciclo Otto, contiene un alto octanaje, pero bajo contenido energético. Se puede utilizar en mezclas con gasolina en las mismas proporciones que el biodiésel siendo estas E5, E10, E20, E30, actualmente Eco-país se comercializa en la ciudad de Guayaquil con una mezcla E10 (Espin, 2016).

2.3.2. Biogás

Es el producto de la descomposición anaerobia de materias orgánicas, esta descomposición debe realizarse sin presencia de oxígeno, en dispositivos denominados biodigestores por acción de bacterias metano génicas. utilizado como sustituto del gas licuado de petróleo (GLP) (Espin, 2016).

2.3.3. Biodiésel

Es un combustible sustituto del gas-oíl para motores diésel, el cual puede ser producido partiendo de materias primas agrícolas (aceites vegetales y/o grasas animales), aceites o grasas de fritura usados y metanol o etanol (estos también pueden ser obtenidos a partir de productos agrícolas).

Para la obtención, es necesario llevar a cabo una reacción química llamada transesterificación que consiste en convertir los aceites vegetales obtenidos por prensado de semillas, filtración, y secado, en biodiésel líquido, tomando una molécula de triglicérido o un ácido graso complejo del aceite, neutralizar los ácidos grasos libres, extraer la glicerina y crear un éster de alcohol, que debe presentar las características del combustible diésel como viscosidad (Damien, 2010). Es necesario que el biodiésel sea mezclado en porcentajes de volumen – volumen con el petrodiésel para ser utilizado como combustible, de esta manera las combinaciones más habituales se dan desde 5% de biodiésel y 95% de petrodiésel (B5), hasta 20% de biodiésel - 80% petrodiésel (B20) (IICA, 2007).

El biodiésel, tiene mayor lubricidad que el diésel de origen fósil, por lo que extiende la vida útil de los motores, desde el punto de vista de la inflamabilidad y toxicidad, es más seguro que el gas-oíl proveniente del petróleo, no es peligroso para el ambiente y es biodegradable. Es más seguro de transportar y almacenar, ya que tiene un punto de inflamación 100°C mayor que el diésel fósil. Se podría explotar a una temperatura de

150°C. También, se degrada de 4 a 5 veces más rápido que el diésel fósil y puede ser usado como solvente para limpiar derrames de diésel fósil (Damien, 2010).

Tabla 1

Características típicas del biodiésel y diésel petrolífero

| Datos Físico-Químicos | Biodiésel | Diésel |
|--|----------------------------|--------------|
| Composición combustible | Metílico ester ácido graso | Hidrocarburo |
| Poder calorífico inferior Kcal/kg (aprox.) | 9500 | 10800 |
| Viscosidad cinemática. constante (a 40°C) | 3.5 – 5.0 | 3.0 – 4.5 |
| Peso específico (g/cm ³) | 0.875 – 0.900 | 0.85 |
| Azúfre (%) | 0 | 0.2 |
| Punto ebullición (°C) | 190 - 340 | 180 - 335 |
| Punto inflamación. (°C) | 120 - 170 | 60 - 80 |
| Punto de escurrimiento (°C) | -15 / +16 | -35 / -15 |

Nota. Larosa (2008)

2.4 Combustible Diésel

Los combustibles que se utilizan para los motores de combustión interna, son materias cuya energía química es capaz de transformarse en calor y posteriormente en trabajo mecánico (Alonso, 2009). El diésel es un combustible líquido proveniente del refinado del crudo de petróleo, es más denso que la gasolina y posee un mayor poder calorífico (Santander, 2010). El diésel está compuesto de parafinas del grupo de hidrocarburos alcanos, es decir, que cuentan únicamente con átomos de carbono e hidrógeno las principales fuentes de alcanos se pueden encontrar en el petróleo crudo y en el gas natural. Así, como la gasolina tiene en el número de octanos el índice o medida de auto inflamación, el diésel tiene su índice en cetanos que es una medida de la calidad de autoencendido del combustible diésel (Santander, 2010).

2.4.1 Combustible diésel en el Ecuador

En el Ecuador, Petrocomercial produce actualmente tres tipos de combustible diésel, los cuales se diferencian principalmente por la aplicación y el contenido de azufre de

cada uno de ellos. El Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) es el encargado de dictar las normas de calidad para el combustible diésel mediante la normativa (NTE INEN 1489, 2012), donde, la clasificación de los combustibles diésel que se comercializan en el país es la siguiente:

- Diésel N°1: es el combustible utilizado en aparatos de combustión externa industriales o domésticos.
- Diésel N°2: es el combustible que se utiliza en los siguientes sectores; industrial, pesquero, eléctrico, naviero, excepto para uso automotriz.
- Diésel premium: es el combustible utilizado en motores de autoignición para la propulsión de vehículos del sector automotriz a nivel nacional.

2.5. Cultivos energéticos

Según Nava y Roldán (2014), se puede entender como cultivo energético a aquel cultivo agrícola, forestal o acuático, cuya producción parcial o total se utiliza como materia prima para generar energía aprovechable. Clasificándolos del siguiente modo:

- Agrícolas: oleaginosos y fermentables, que a su vez pueden ser herbáceos o leñosos.
- Forestales: especies forestales, en particular las tradicionalmente utilizadas para madera.
- Acuáticos: que son los menos desarrollados y se trata con algas, pero hay otras opciones viables.

Los cultivos susceptibles de ser utilizados como productores de energía deben seleccionarse de acuerdo con la premisa general de obtener de forma rentable la

máxima cantidad posible de energía neta compatible con las condiciones edafoclimáticas de cada zona (Sardón, 2003).

2.5.1. Higuerilla

El origen de la higuerilla (*Ricinus communis* L.) se creía inicialmente que podía haberse dado en cuatro lugares: Este de África (Etiopía), Noreste y Sureste de Asia y Península Árabe, India, y China (Severino et al., 2012). Sin embargo, Etiopía es considerado como el lugar de origen más probable debido a la presencia de una gran diversidad (Anjani, 2012).

El cultivo es plantado como oleaginosa de uso industrial, promisorio por sus amplios beneficios sociales y ambientales. El aceite de su semilla, contenido entre 40 y 60%, es utilizado en más de 700 aplicaciones industriales, y también como fuente de energía, siendo importante para la obtención de biodiesel, combustible no fósil, que puede sustituir aquellos derivados del petróleo, mitigando los efectos negativos que estos últimos tienen sobre el calentamiento global y el ambiente en (Mazzani et al., 2013).

Se produce en la Costa, Sierra y Amazonia hasta los 3000 msnm, tiene gran capacidad de adaptación y posee la ventaja de ser un cultivo con potencial de mecanización, y prospera en suelos fértiles bien drenados, no alcalinos ni salinos. (IICA, 2010). Además, el aceite de su semilla, contenido entre 40 y 60%, es utilizado en más de 700 aplicaciones industriales (Mazzani et al., 2013).

Morfología vegetal

La planta varía en el color del follaje y del tallo, tamaño de la semilla, color y contenido de aceite y en sus hábitos de crecimiento, siendo algunas veces desde perenne, que a menudo se desarrollan como árboles (>7 m), hasta plantas enanas, anuales y de ciclo corto (Weiss, 1983). En relación con el porte, las plantas de higuerilla se clasifican en

enanas (<1,8 m), medias (1,8 a 2,5 m) y altas (>2,5 m), las cuales pueden llegar hasta los 10m de altura y lograr ciclos de hasta 10 años, cuando las condiciones ambientales, especialmente, temperatura y disponibilidad de agua lo permitan (Beltrão, et al., 2001) y (Moshkin, 1986).

- Raíz: es pivotante y puede alcanzar hasta 3 m de profundidad constituyéndose el anclaje principal de la planta. Presenta raíces secundarias numerosas y oblicuas, situadas a poca profundidad (Ramirez, 2008).
- Tallo: la planta está dotada de un tallo principal recto seccionado por entrenudos, hueco en su parte interior lo cual facilita la eliminación de la soca. Su color depende de la variedad puede ser verde, rosado o caoba. El tallo principal termina en el primer racimo (inflorescencia), siendo este el más grande de la planta. A partir del cuarto nudo empiezan a aparecer las ramas secundarias que producen a su vez ramas adicionales observándose en ambas producciones de racimos (Ramirez, 2008).
- Hojas: alternas, pecioladas, palmeadas con 7 a 11 lóbulos, dentadas, con nerviación palmatinervia. Pecíolos redondos de 8 a 50 cm. de largo y de 10 a 20 cm. de longitud; con dos glándulas nectaríferas en la unión con la lámina, dos glándulas en la unión con el pecíolo; la lámina de la hoja tiene 10 a 75 cm. de diámetro y de un color que va de verde a rojo (Ramirez, 2008).
- Flores: están agrupadas en una panícula terminal de 10 a 40 cm. de largo, la cual es monoica, las flores femeninas están localizadas en la parte superior y las masculinas en la parte inferior de la inflorescencia. Las flores masculinas están en cimas de 3 a 16 flores de pedicelo de 0.5 a 1.5 cm de largo, de 3 a 5 sépalos verdes de 5 a 7 cm. de largo, pétalos ausentes, estambres numerosos de 5 a 10 mm de largo con muchos filamentos ramificados, cada filamento termina en una antera pequeña esférica y de color amarillo claro. Las flores femeninas en cimas de 1 a 7 flores, pedicelo de 4 a 5 mm de largo de 3 a 5 sépalos de color verde de 3 a 5 mm de largo los cuales se caen rápidamente; ovario superior con tres celdas, un óvulo por cada celda, la pared

del ovario cubierta con espinas verdes y suaves, cada una termina en un punto transparente, el cual se cae cuando el fruto se desarrolla, estilo muy corto que se divide en tres estigmas bien definidos de color rojo, suaves y persistentes (Ramirez, 2008).

- Frutos: es una cápsula globosa con pedicelo alargado con tres lóculos de 1.5 a 2.5 cm. de diámetro, generalmente espinoso. Los frutos inmaduros son generalmente verdes y algunas veces rojos, se vuelven cafés en la maduración, los estigmas permanecen en el fruto en forma leñosa. La cápsula puede abrirse y soltar las semillas que son tres, estas pueden ser negras o jaspeadas (Ramirez, 2008).
- Semillas: De forma oval aplastada, redondeadas en un extremo y en el otro extremo una excrecencia llamada carúncula, de superficie brillante y lisa, de color variable que suele ser gris con manchas rojizas y parduscas de tamaño variable que va de 0.5 a 1.5 cm de largo; la semilla tiene una cubierta dura y quebradiza exterior y otra inferior muy fina de color blanquecino, ambas protegen la semilla, la cual consta de un embrión pequeño con sus dos cotiledones delgados y el albumen que es blando, compacto y aceitoso, el albumen es el que contiene el aceite. La semilla contiene toxinas que son ricina (albúmica) y la ricenina (alcaloide) las cuales quedan en el bagazo o torta que sobra en la extracción del aceite (Ramirez, 2008).

Morfometría de las semillas de higuera

De acuerdo con la International Seed Testing Association (ISTA, 2005), de forma aleatoria, de cada zona monitoreada y del total de semillas recolectadas, se tomaron 100 muestras para el análisis de morfometría. Moshkin (1986) menciona que, las semillas son ovaladas, rara vez esférica o alargada, su longitud es de 0.8 a 3 cm, 0.6 a 1.5 cm de ancho y 0.4 a 1.0 cm de espesor. Por otra parte, este órgano está cubierto por un tegumento (testa) duro y quebradizo, por debajo del cual se encuentra una fina capa que envuelve el albumen, que es blanco, compacto y rico en aceite (Beltrão, et al., 2001) y (Weiss, 1983).

La semilla está constituida por un 25% a 35% de epicarpio (testa) y un 65% a 75% de endospermo; su composición química está dada por agua (5.5%), aceite crudo (48.6%), proteína cruda (17.9%), fibra bruta (12.5%), cenizas (2.5%) y carbohidratos (13%) (Freire, 2001). Adherido al embrión y en la parte externa de la semilla, se encuentra la carúncula, ecológicamente conocido como eleosoma, estructura rica en lípidos, proteínas, almidones y vitaminas, la cual atrae hormigas, que mejoran su dispersión por varios metros a partir de la planta madre. Varios estudios han indicado, que la carúncula tiene un papel importante al ayudar a la semilla a germinar en condiciones de baja disponibilidad de agua en el suelo (Severino et al., 2012).

La semilla varía en color, forma, tamaño, proporción de testa y la presencia o ausencia de carúncula. El peso de 100 semillas va desde 10 a 100 g, con media de 30 g en los cultivares de porte enano y de 45 a 75 g en aquellos de porte medio (Beltrão et al., 2001). El principal producto de la higuerrilla es el aceite extraído de sus semillas, conocido como aceite de ricino o castor oil. Este aceite es una materia prima importante para la industria química, con innumerables aplicaciones, desde su uso en pinturas, cosméticos, polímeros y lubricantes hasta la obtención de biodiesel (Chierice y Neto, 2001).

Manzano (2009), utilizó un calibrador marca Vernier para la dimensión de las semillas (largo, ancho y grosor), con un rango de 0-150mm. Mientras que Leython (2008), para determinar el tamaño midió largo, ancho y grosor (l x a x g) con papel milimétrico, siempre en este orden y expresado en milímetros, lo realizó con 15 semillas por especie, de diferentes eco tipos, es decir se tomaron 15 mediciones y los valores se refieren a promedios. También, el largo de las semillas fue medido desde el extremo hilar hasta el calazal; el ancho fue medido en la porción media y más ancha de la semilla al igual que el grosor.

Requerimientos agroecológicos

A pesar de que la higuera demuestra tener gran vigor y persistencia bajo diferentes condiciones de crecimiento, los requerimientos ecológicos deben ser favorables a fin de obtener mayor productividad. En general, su habilidad para producir frutos maduros es limitado por el clima, en especial cuando ocurren altas temperaturas y exceso de humedad durante su crecimiento (Mendoza y Reyes, 2015).

Requerimientos climáticos

La higuera, se encuentra presente en diferentes zonas de vida y puede tolerar precipitaciones anuales de 200 a 4 290 mm y temperaturas anuales en un rango de 7°C a 27.8°C. En regiones tropicales y subtropicales la planta es de tipo perenne, aunque en entornos con fuertes heladas o con una estación seca muy marcada es tratada como un cultivo anual para evitar la muerte de plantación (Falasca et al., 2012).

La temperatura media anual requerida durante el ciclo para que el cultivo tenga potencial productivo alto debe oscilar entre 19°C y 30°C. Si la temperatura es menor de 19°C se podría incrementar el ciclo de cultivo y disminuir la producción de semilla, mientras que las altas temperaturas, mayores a 38°C, provocan reducción sustancial del contenido de aceite en los granos y reversión sexual de flores féminas a masculinas (Córdova et al., 2008). Es una planta heliófila, por lo que debe ser sembrada en plena exposición solar (si se siembra a la sombra, su crecimiento y producción son perjudicados sensiblemente) (IICA y Samayoa, 2007).

Requerimientos edafológicos

En siembras, se utiliza la sembradora con un disco de distribución adecuado para depositar una semilla por metro, a una profundidad de 5 cm cuando hay humedad y a 8 cm, si no hay humedad, con un espaciamiento entre surcos de 1 m, generalmente, Es

de gran importancia respetar la profundidad de siembra mencionada, ya que el calor, debido al alto contenido de aceite de la semilla, la quema y disminuye mucho la germinación (MAG, 1991). El rango óptimo de pH para el desarrollo del cultivo de higuierilla es de 5.5 a 7 por lo tanto, valores de pH por debajo de 5.4 afectan al crecimiento normal y el potencial de rendimiento del cultivo (Martinez, J., & Montenegro, O., 2008).

2.6. Fenología Vegetal

Aponte y Sanmartin (2011) se refieren a la fenología como la ciencia que estudia el comportamiento periódico de la vida de las especies vegetales y animales en relación a las condiciones ambientales como temperatura, luz, humedad, entre otros. Mientras que Lieth (1997) describe, como “el arte de observar las fases del ciclo de vida o las actividades de las plantas y los animales en su ocurrencia temporal durante todo el año”. Perez, Villalba y Almanza (2013) mencionan que la dinámica vegetal es la mejor manera de percibir los cambios periódicos de una temporada a otra durante el año, que se manifiestan al cumplirse los fenómenos visibles de su vida, los que se acomodan a cierta periodicidad y se relacionan con el clima del lugar en el que ocurre, determinando el tiempo de germinación de semillas.

2.6.1. Fases fenológicas

Cara (2006) considera, fenómenos observables que comprende cambios o transformaciones en un corto periodo de tiempo, mientras que, el intervalo que ocurre entre dos fases sucesivas lo denomina etapa. Para describir y estudiar la fenología es necesario conocer el desarrollo de cada fase fenológica y su interacción dentro del medio.

Floración

Es la etapa más importante del ciclo de vida de las plantas, es el tiempo en el cual se desarrollan las flores y se mantienen abiertas para que se lleve a cabo la polinización, (Rodríguez, 2016). La fenología de la floración se ocupa de este evento reproductivo en relación a los cambios climáticos estacionales, es un proceso importante para producir semillas y mantener la especie (Sánchez y Larrote, 2011).

Fructificación

Comprende el crecimiento inicial y desarrollo de los frutos, después de la polinización y fertilización de las flores, una planta es fructificante cuando los frutos amarran y prosperan hasta la cosecha, y es fértil cuando produce semillas viables (Jijón y Torres, 2008).

2.7. Cosecha

Esta operación es importante en el cultivo de higuera, un atraso en la cosecha causará la pérdida de semillas, a consecuencia de la caída de frutos por efecto de la dehiscencia. Por lo que generalmente se debe cosechar cuando los frutos del tercio inferior de los racimos están secos, lo que dará lugar a realizar cuatro o cinco pases de cosecha en todo el ciclo del cultivo. Mientras que, para las variedades indehiscentes solo será necesario realizar uno o dos pases de cosecha cuando los frutos están completamente secos (Espinoza, et al., 2019).

Los racimos son cortados con cuchillos afilados, tijeras podadoras, y son colocados en recipientes plásticos o costales amarrados en la cintura del trabajador. La mejor hora para hacer la recolección son las de la mañana. El corte de los racimos puede hacerse cuando estos han secado completamente pero se corre el riesgo de que se hayan desgranado o se desgranen al tirar los racimos al suelo (Arango, 1990).

2.8. Desgrane

En el manipuleo de la secada, si la variedad es altamente dehiscente un gran porcentaje de las cápsulas se desgranar en el proceso, el resto, una vez separados los vástagos secos, es necesario desgranarlos manualmente (Arango, 1990). En las variedades indehiscentes deben descascararse a máquina, para esta labor existen equipos de gran eficiencia y rendimiento (Espinoza, et al., 2019).

Cornejo y Estrada (2012) colocaron al sol los racimos de higuierilla, para secar la testa y romperla, de esta forma sacar la semilla, las capsulas que no son posibles romper al momento de secarse, se rompen manualmente con el apoyo de unas pinzas de disección.

2.9. Contenido de Humedad

Es el factor importante en análisis de la calidad, determina el número de semillas puras por unidad de peso, usualmente se realiza en kilogramos, el peso dependerá del tamaño de semilla, su contenido de humedad y la cantidad de semilla pura (Quijada, 2017).

Cornejo y Estrada (2012), colocaron 100 g de semillas en cápsulas de porcelana, peso inicial de referencia, a una temperatura de 100°C a 105°C en un horno de laboratorio marca Felisa, por un periodo de 4 horas. Al final obtiene el porcentaje de humedad por diferencia de pesos utilizando la siguiente fórmula:

$$\%CH = \left(\frac{P_i - P_s}{P_i} \right) * 100 \quad (1)$$

Donde:

%CH = porcentaje contenido de humedad

Pi = peso inicial

Ps = peso seco

Correa, pesó una cápsula de porcelana previamente esterilizada con alcohol (P1). Utilizando las muestras homogeneizadas, colocó una cierta cantidad de semillas de higuera en la cápsula (P2), y llevó a la estufa a 105°C por 24 horas. Para obtener el peso de la muestra de higuera tomada (P3) utilizó la Ecuación 2 (Correa, 2014).

$$P3 = P2 - P1 \quad (2)$$

Una vez transcurrido el tiempo establecido sacó la muestra de la estufa y dejó enfriar en el desecador, por unos minutos hasta obtener una temperatura uniforme. Se pesó nuevamente la cápsula (P4) y para obtener el valor del peso seco de la muestra (P5), realizó la ecuación 3 (Correa, 2014).

$$P5 = P4 - P1 \quad (3)$$

Para calcular el porcentaje de humedad, utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = 100 - ((P5 + P3) * 100) \quad (5)$$

2.10. Trituración de las Semillas

Cornejo y Estrada (2012) para la molienda de las semillas de higuera emplearon un molino para carnes marca Biro de 7.5 HP, la semilla quedó totalmente triturada. En cambio, Correa (2014) utilizó un molino manual para triturar que contaba con una abertura de trituración de 4mm, por lo que toda semilla quedaba totalmente triturada.

2.11. Extracción de Aceite

La extracción es la técnica más empleada para la separación y posterior purificación de componentes en una mezcla, o para aislar un compuesto orgánico de sus fuentes naturales. Se define como la separación de un componente de una mezcla por medio de un disolvente orgánico. En una extracción los diferentes componentes de una mezcla se distribuyen entre las fases orgánica y acuosa, según sus solubilidades relativas. El producto de la extracción contiene además del producto deseado, residuos del material original, productos secundarios y disolvente. Los métodos de extracción usados actualmente emplean tóxicos y costosos solventes, que van en detrimento de la salud, igualmente los mismos métodos requieren de elevadas temperaturas de trabajo que aceleran la degradación de los productos esperados modificando su estructura o permitiendo la formación de otros metabolitos (Velásquez, 2008). El aceite que contiene la semilla de higuera, no se puede extraer mediante la trituración, puesto que se contaminaría con la ricina, una fitotoxina altamente tóxica que contiene la planta y se concentra en las semillas (Little W, 2012).

2.11.1. Expeller o tornillo extractor

Es una máquina destinada a la compresión de semillas para la extracción de aceite. La extrusión debe realizarse con una combinación de cáscara de almendra para formar una pasta dura que se pueda comprimir. Esta máquina puede ser electrónica o manual. Se introducen las semillas de higuera y las cáscaras de almendra comprimiendo y triturando la mezcla hasta que el aceite sale por unos orificios y la pulpa sale por otro extremo (Mondragón, R., 2009).

2.11.2. Extracción por solventes

Es un proceso en el que consiste utilizar solventes para extraer aceite de la semilla. Se da una difusión del solvente en la materia prima que contiene el aceite dando una

solución de aceite en solvente. Una vez hecho esto se recupera el solvente por evaporación y condensación de este y deja el aceite por separado (Mondragón, R., 2009).

Extracción Soxhlet

Es un método de extracción continuo que se utiliza para materiales sólidos. Consiste en colocar el material a extraer, previamente molido y pesado, en un cartucho de celulosa que se introduce en la cámara de extracción, conectada por una parte a un balón de destilación y por otra a un refrigerante. El disolvente contenido en el balón se calienta a ebullición, el vapor asciende por el tubo lateral y se condensa en el refrigerante, cayendo sobre el material. Cuando alcanza el nivel convenientemente el sifón por tubo regresando al balón. El proceso se repite hasta conseguir el agotamiento deseado del material o solvente (Lamarque, 2008).

Así, el líquido condensado cae dentro del dedal o cartucho que contiene el sólido. El solvente caliente empieza a llenar el dedal y extrae el compuesto deseado a partir del material vegetal. Una vez el dedal se llena con el solvente, el brazo de la derecha actúa como sifón, y el solvente, el cual contiene el compuesto deseado disuelto, se regresa dentro del balón de destilación. El ciclo vaporización-condensación- evacuación por el sifón, se repite varias veces, y el producto deseado se concentra en el balón de destilación (Rogelio, 2008).

Valderrama (1994) menciona que, aunque es un proceso extremadamente lento e imposible de acelerar y se requiere gran cantidad de disolvente, logra ser un procedimiento muy eficaz para la extracción de aceites vegetales y puede reducir el contenido de aceite de las semillas oleaginosas hasta menos de un 1%, la extracción por prensado deja un residuo aproximado de 6%. La extracción por solvente es especialmente ventajosa en el tratamiento de semilla con un contenido bajo de aceite. La extracción por solvente es una típica operación de transferencia de masa, donde el

solvente penetra en el sólido y el aceite contenido en él se hace miscible con el solvente (Valderrama, 1994).

Navarrete (2009) realizó extracciones empleando cantidades que van desde 30g a 50g de la semilla triturada, con 200ml del solvente orgánico en un equipo Soxhlet a temperatura de ebullición del solvente que para el caso del hexano es de 69°C y para el éter de petróleo se encuentra entre 30°C a 40°C, durante un periodo de 5 horas, luego el aceite se separa del solvente a través de una destilación y recuperar así mismo gran parte del solvente. El porcentaje promedio de aceite extraído con solvente hexano fue de 52.7% y extracción con éter de petróleo fue de 56.4%.

2.11.3. Extracción con fluido supercrítico

Un fluido supercrítico es cualquier sustancia a una temperatura y presión por encima de su punto crítico termodinámico, tiene la propiedad de difundirse a través de los sólidos, y de disolver los materiales como un líquido. Adicionalmente, la densidad con pequeños cambios en la temperatura o presión. Estas propiedades lo hacen conveniente como un sustituto de los solventes orgánicos en los procesos de extracción (Velasco et al., 2007).

La extracción por fluidos supercríticos satisface en gran manera los requisitos exigidos, puesto que el impacto de éste para el medio ambiente es considerablemente más bajo, comparado con los métodos de extracción convencionales y también los productos obtenidos mantienen sus propiedades. La conservación de las propiedades se debe en gran medida a que las materias primas utilizadas no son sometidas a temperaturas elevadas que alteran las propiedades químicas de los compuestos obtenidos; por ejemplo, la calidad de los ácidos grasos poliinsaturados de diferentes materias primas no se ve afectada, ya que, mediante el empleo de esta técnica, la extracción se realiza a temperaturas inferiores a 65°C (Alkio et al., 2000).

El proceso de extracción por fluidos supercríticos o “tecnología de los solventes verdes” es muy similar a la extracción convencional, una de las principales diferencias radica en usar como agente extractor un fluido supercrítico en lugar de un líquido, así, el poder solvente de los fluidos supercríticos se encuentra en función de la densidad, ésta puede ser variada por aumentos graduales ya sea en la presión o en la temperatura (Velasco et al., 2007).

El proceso de extracción por fluidos supercríticos, consta básicamente de cuatro etapas (Kiran et al., 2012; Brunner, 2013):

- Presurización: Se eleva la presión, por encima de la presión crítica de la sustancia a emplear como solvente.
- Ajuste de temperatura: Se eleva o disminuye la temperatura, por cualquier medio físico o mecánico, para llevar el solvente a la temperatura adecuada de extracción (por encima de su temperatura crítica).
- Extracción: El fluido supercrítico entra en contacto con la muestra que contiene el soluto de interés en el extractor.
- Separación: El solvente se descomprime a una presión inferior a la crítica, lo que provoca que se libere del soluto.

La extracción puede llevarse a cabo de forma estática o forma dinámica. En la forma estática, la celda o cilindro de extracción es presurizado manteniendo cerrada la válvula de salida del extractor. Finalizada la extracción la válvula es abierta, permitiendo el paso del fluido con los compuestos extraídos al sistema de colección (Brunner, 2013).

En la forma dinámica, el fluido en estado supercrítico se deja fluir de manera continua por el cilindro de extracción, manteniendo las válvulas de entrada y salida del cilindro extractor abiertas durante el tiempo de extracción (Brunner, 2013). Se tiende a pensar

que la extracción dinámica produce mejores y más rápidas recuperaciones, ya que, de esta manera, durante todo el proceso se produce la continua renovación que entra en contacto con la muestra, lo que dificulta la posibilidad que el fluido pueda llegar a saturarse. Sin embargo, la extracción estática permite una mayor penetración del fluido en los poros de la muestra, permitiendo alcanzar el equilibrio de reparto entre la matriz y el fluido. Por esta razón la técnica de extracción estática en la práctica es la más empleada, seguida por una extracción dinámica corta, donde se recolecta el compuesto de interés (Kiran et al., 2012).

Extracción y fraccionamiento para lípidos

Las aplicaciones de FSC en esta área se relacionan básicamente con el uso de dióxido de carbono (CO₂) no deja residuos químicos en el aceite (Velasco et al., 2007). Además, la ventaja principal de utilizar CO₂ supercrítico está en la calidad del aceite obtenido por este medio en comparación con los aceites extraídos con solvente orgánicos tradicionales (Mangold, 1983). Otras ventajas comparativas que menciona Hurtado (2002), son aceites prácticamente libres de fosfolípidos y glicolípidos. Los aceites convencionales contienen de 1% a 3% de lípidos polares, aceites claros y desodorizados.

Pantoja (2016) aplica la tecnología de extracción con fluidos supercríticos bajo diferentes condiciones de presión y temperatura. Para lograrlo, manejó un equipo Waters SFE-500 (USA), y utilizó CO₂ al 99.9% de pureza como solvente. El proceso extractivo llevó a cabo utilizando una carga de 250 g de semillas tratadas, intervalos de presión de 200 a 350 bares, temperaturas entre 40° C y 60°C, manteniendo un flujo constante de 30 g CO₂/min y un tiempo de 150 min. Por lo tanto, estudió el comportamiento del rendimiento de aceite mediante la ecuación 5 y se expresó como porcentaje de aceite extraído. El porcentaje de aceite extraído fue de 13.3% al 22.2% teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente fijó el tiempo de extracción en 150 minutos para todo el diseño experimental, tiempo en el cual recuperó más del 70% del

aceite contenido en las semillas, debido a que es un criterio de trabajo, puesto que en la práctica industrial no se llega a agotar totalmente la materia prima dado a largos tiempos de extracción y los costos asociados a ellos.

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso aceite extraído}}{\text{Peso semilla utilizada}} * 100 \quad (5)$$

2.12. Biodiésel

El proceso de elaboración de biodiésel consiste en obtener el aceite que se va a emplear como principal materia prima, el cual puede obtenerse de semillas de plantas oleaginosas o de grasas animales con o sin uso previo como es el caso de aceite de frituras que han sido utilizados para preparación de comidas, siguiendo un proceso químico. Se utiliza como sustituto total o parcial del diésel obtenido del petróleo (Espin, 2016).

Para utilizarlo como combustible en vehículos de motor diésel se puede aplicar 100% puro, pero realizando una serie de modificaciones en los motores o mezclado en diferentes porcentajes con el diésel. Por ejemplo, si se utiliza 20% de biodiésel y 80% de diésel derivado del petróleo a esta mezcla se denomina B20, de acuerdo con esto existen las siguientes mezclas y sus denominaciones B5, B10, entre otras. Siendo la mezcla B20 la más aconsejable para el uso en motores sin necesidad de realizar modificación alguna en el motor (Espin, 2016). El biodiésel ha alcanzado un gran interés debido a sus múltiples ventajas entre las que se puede destacar (IICA, 2007):

- El biodiésel tiene mayor lubricidad que el diésel de origen fósil, por lo que extiende la vida útil de los motores. Más seguro de transportar y almacenar, ya que tiene un punto de inflamación 100°C mayor que el diésel fósil.
- Se degrada de 4 a 5 veces más rápido que el diésel fósil y puede ser usado como solvente para limpiar derrames de diésel fósil. Permite al productor agrícola

autoabastecerse de combustible; además, su producción promueve la inclusión social de los habitantes menos favorecidos del sector rural, debido a que no requiere altos niveles de inversión.

2.12.1. Compuestos para elaboración de biodiésel

Para obtener biodiésel es necesario la mezcla de tres compuestos los cuales se mencionan a continuación:

Aceite vegetal

Los aceites vegetales se extraen de semillas oleaginosas, algunas semillas pueden contener aceites con importantes características nutricionales que sirven para alimentación y otras contienen aceites industriales (Espin, 2016).

Alcohol

Los alcoholes son compuestos químicos orgánicos, el alcohol utilizado para elaborar biodiésel debe ser lo más puro posible, pero desde el punto de vista económico también debe ser muy asequible. Existen dos tipos de alcoholes de cadena corta más utilizados para la elaboración de biodiésel, estos son:

- Metanol: Es conocido también como alcohol metílico, su fórmula química es (CH₃OH). Es un líquido ligero, muy volátil la temperatura de ebullición es de 64.5°C, es incoloro, inflamable y tóxico (Olmedo et al., 2015).
- Etanol: Conocido como alcohol etílico (CH₃-CH₂-OH) tiene similares características al metanol. Su temperatura de ebullición es de 78.3°C, es menos tóxico que el metanol (Olmedo et al, 2015). El etanol es uno de los alcoholes más antiguos, se dice que se descubrió este alcohol al consumir frutas fermentadas.

Catalizador

Los catalizadores para el proceso de transesterificación pueden ser ácidos heterogéneos u homogéneos y básicos. Para procesos industriales los catalizadores deberán ser básicos ya que actúan mucho más rápido, el problema de estos catalizadores es que deben ser anhídridos para evitar reacciones secundarias indeseadas como la saponificación, ya que reduce el rendimiento del proceso (Fernandez, 2010).

Los catalizadores ácidos no se utilizan en procesos industriales ya que es necesario contar con presiones y temperaturas elevadas, además hacen más lento el proceso para la elaboración de biodiésel, la ventaja de los catalizadores ácidos es que no es necesario utilizar un aceite virgen o muy refinado, el aceite puede contener grandes cantidades de ácidos grasos (Fernandez, 2010).

2.12.2. Proceso de elaboración de biodiésel

El proceso de elaboración de biodiésel consiste en obtener el aceite que se va a emplear como principal materia prima, el cual puede obtenerse de semillas de plantas oleaginosas o de grasas animales. Según datos citados de (Viloria, 2012) con los siguientes elementos se puede producir 1005 kg de biodiésel:

- 110 kg de metanol
- 15 kg de catalizador
- 1 000 kg de aceite
- 4 290 litros de agua

El proceso químico que se debe seguir para elaborar el biodiésel se llama transesterificación, consiste en tres reacciones reversibles y consecutivas donde el

triglicérido es convertido en di glicérido, mono glicérido y por último en glicerina, en cada proceso un mol de éster metílico es liberado (Fernandez, 2010).

Esta operación se logra al mezclar el alcohol, siendo este metanol o etanol con un catalizador el cual puede ser hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH) con el fin de obtener metóxido de sodio (CH₃ONa) o metóxido de potasio (CH₃OK) el cual se mezclará con el aceite que se tiene para la producción de biodiésel debidamente calentado, este proceso se realiza en un reactor. La glicerina se depositará en el fondo y en la parte superior flotará el metil ésterer o biodiésel, depende de la tecnología del reactor este podrá contar con fases de separación, purificación y estabilización (Viloria, 2012).

Reactor

Para la elaboración de biodiésel se puede utilizar un reactor continuo o discontinuo según Fernandez (2010), todo depende de la cantidad de biodiésel a elaborar, para grandes cantidades es necesario utilizar un reactor continuo.

- Reactor discontinuo o proceso discontinuo: Este es el proceso más simple para la elaboración de biodiésel. Los reactores cuentan con agitación, donde el reactor por lo general está sellado. Las condiciones de operación más empleadas son a temperaturas que oscilan entre 25°C a 85°C, el catalizador más empleado en este proceso es el NaOH o el KOH, dependiendo del catalizador, es necesario realizar agitaciones rápidas para una correcta mezcla en el reactor entre el aceite, el catalizador y el alcohol. Antes de finalizar el proceso de producción de biodiésel la agitación debe ser más lenta con el fin de separar el glicerol, el rendimiento de este proceso varía entre 85% y 94% de producto.
- Reactor continuo o proceso continuo: Es una variación del proceso discontinuo, con el fin de elevar la producción, como su nombre mismo lo indica este reactor trabaja

de forma continua, cuenta con dos depósitos grandes los cuales contienen la suficiente materia prima para elaborar el producto durante mucho tiempo, estos depósitos se pueden reabastecer cada vez que lleguen a cierto nivel, sin necesidad de parar el reactor, con este tipo de proceso se puede alcanzar un rendimiento de 98%.

Transesterificación

La temperatura más conveniente para efectuar la reacción de transesterificación en la producción de biodiesel con aceite de higuera en las condiciones establecidas de reacción es de 40°C a 50°C, pues a estos grados se encuentra la máxima conversión en metil éster del ácido de mayor presencia en el aceite de higuera (Guerrero et al., 2010).

2.12.3. Cantidad de biodiésel necesario para cubrir el escenario B5 en Imbabura

La cantidad de biodiesel necesario se calculó mediante el modelo de regresión, obteniendo los valores de la demanda proyectada al 2030. El diésel necesario para remplazar por biodiesel B5 proveniente de higuera en 2016 es de 1 584 094 gal y en el año 2030 es de 2 728 580 gal (Velalcázar, 2018).

2.2. Marco Legal

La presente investigación tiene su sustento en la (Constitución de la República del Ecuador, 2008) y en el Decreto Ejecutivo 1303 expedido el 28 de septiembre del 2012, así establece en los artículos:

“Art. 15.- El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto.

La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua”.

“Art. 413.- El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua”.

2.2.1. Decreto Ejecutivo 1303

“Art. 1.- Declárese de interés nacional el desarrollo de biocombustibles en el país como medio para el impulso del fomento agrícola. La producción, el uso y el consumo de los biocombustibles responderán a una estrategia inclusiva de desarrollo rural, precautelando la soberanía alimentaria y sostenibilidad ambiental”.

“Art 2.- El combustible diésel Premium que se utilice en el país deberá contener biodiesel de origen vegetal de producción nacional, para uso en motores diésel”.

“Art. 3.- Contados ocho (8) meses a partir de la suscripción del presente Decreto Ejecutivo, la distribución y comercialización de la mezcla de diésel base con biodiesel de producción nacional, se aplicará en todo el territorio nacional en una proporción del 5% de biodiesel (B5), de acuerdo con los requisitos técnicos que determine la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero.”

“Art. 4.- La producción, distribución y comercialización de biodiesel estará sometida a la libre competencia, y como tal, podrán participar en estas actividades las personas naturales o jurídicas de carácter público o privado, en igualdad de condiciones, según lo establece la Ley Orgánica del Sistema Nacional de Contratación Pública”.

“Art. 5.- La transportación de biodiesel desde los centros de producción hasta las terminales de la EP PETROECUADOR, será de responsabilidad de los productores, distribuidores y comercializadores de biodiesel; y, la recepción, almacenamiento, mezcla del biodiesel con diésel base y la comercialización de dicha mezcla, será responsabilidad de PETROECUADOR de acuerdo con la normativa que establezca la Agencia de regulación y Control Hidrocarburífero, para el efecto”.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

A continuación, se muestra la metodología a seguir para el cumplimiento de los objetivos planteados. Se detalla el procedimiento que se llevara a cabo, basándose en investigaciones previas y adecuándolas a la metodología que se deseó realizar.

3.1. Descripción del Área de Estudio

El área donde se realizó el estudio de esta investigación está comprendida en las zonas de cultivo de Higuierilla (*Ricinus communis* L) en la provincia de Imbabura, está localizada en la sierra del norte del Ecuador, en las coordenadas 00° 07' y 00° 52' latitud norte; 77° 48' y 79° 12' longitud oeste, cubriendo 4 353 Km², la altitud de la provincia oscila entre 600 msnm, en la parte baja del río Guayllabamba, y 4 939 msnm en la cima del volcán Cotacachi.

También, la condición meteorológica en Imbabura es variado, va desde un seco y muy seco en la hoya del Chota, pasa por uno mediterráneo y templado seco en Ibarra, por un frío y de páramo en los Andes, un clima húmedo en Otavalo y Cotacachi, hasta un templado subtropical húmedo de tierras altas en el oeste y noroeste de la provincia. Así, la temperatura promedio va desde 13°C a 27°C, y las precipitaciones varían de 340 a 3 000 mm anuales (Gobierno Autonomo Descentralizado de Imbabura, 2015).

3.1.1. Ubicación Geográfica

La Tabla 2, detalla el país, provincia, cantón y sector junto con sus respectivas coordenadas UTM (Universal -Transversal de Mercator) por cada punto de muestreo desarrollado en la investigación para el cultivo de Higuierilla (*Ricinus communis* L.). También, se tiene dos zonas, tanto óptimas como no óptimas.

Las zonas óptimas constan de tres sectores (Paragachi, Juncal y Tumbabiro), datos que se obtuvo del estudio de “Evaluación de la demanda de biodiésel B5 a partir del cultivo energético de higuierilla (*Ricinus communis* L.) en la provincia de Imbabura” realizado por Velalcázar (2018). Por otro lado, se llevó a cabo el levantamiento de datos in situ para obtener las zonas no óptimas que constan de tres sectores (Cotacachi, Chaltura y Milagro).

Tabla 2
Ubicación geográfica del muestreo

| Cantón/Sector | Coordenada UTM | |
|-------------------------|----------------|-------|
| | X | Y |
| <i>Zonas óptimas</i> | | |
| Pimampiro/Paragachi | 172741 | 45135 |
| Ibarra/Juncal | 819547 | 45208 |
| Urcuquí/Tumbabiro | 813671 | 51961 |
| <i>Zonas no óptimas</i> | | |
| Cotacachi/Cotacachi | 805419 | 33629 |
| Antonio Ante/Chaltura | 811749 | 39182 |
| Ibarra/Milagro | 819824 | 39325 |

En la Figura 1, se aprecia la ubicación geográfica del área de estudio, el cual consta de tres mapas, el primero es a nivel nacional (Ubicación en el Ecuador), el segundo a nivel provincial (Ubicación en la provincia) y el tercero es la ubicación de los puntos de zonas óptimas y no óptimas de cultivo de Higuierilla (*Ricinus communis* L.).

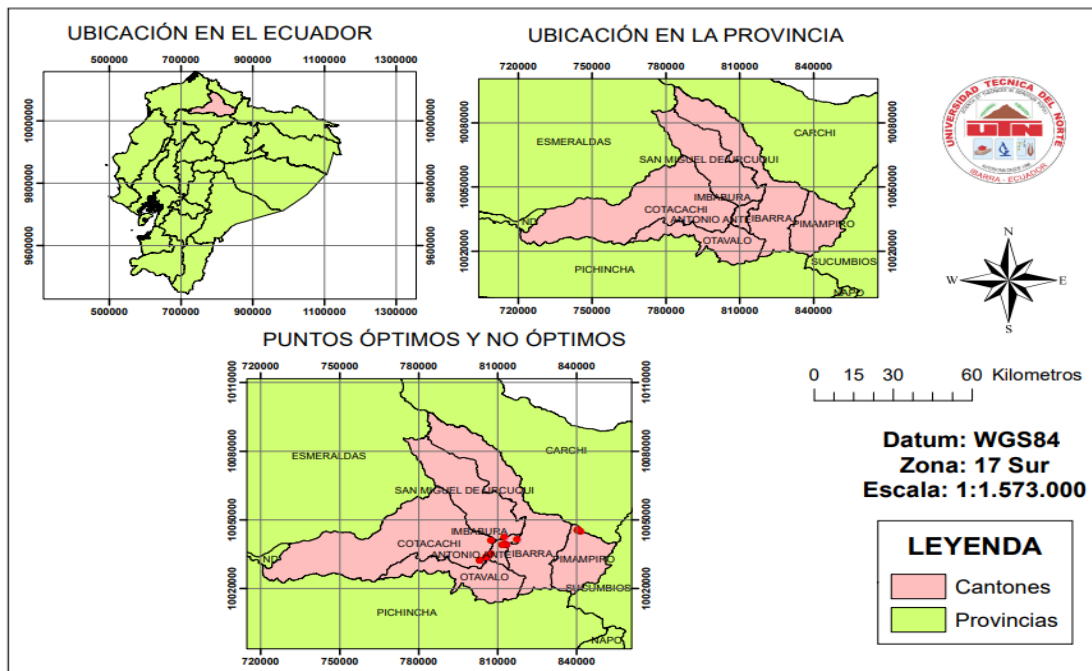


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

3.2. Métodos

A continuación, se muestra detalladamente el procedimiento realizado para cada uno de los objetivos específicos que se plantearon, para poder cumplir el objetivo general de este trabajo de investigación. Los pasos seguidos se indicarán con claridad, definiendo también los materiales usados y equipos requeridos para los análisis que se llevó a cabo.

3.2.1. Análisis morfométrico de las semillas de higuierilla (*Ricinus communis* L.) provenientes de zonas cultivadas tanto óptimas y no óptimas de la provincia de Imbabura

Para la investigación se definió seis puntos aleatorios de cultivo de higuierilla dentro de la provincia de Imbabura, de los cuales tres puntos pertenecen a zonas óptimas datos que se obtuvieron de un estudio previo antes mencionado y tres puntos de zonas no

óptimas basándose según la densidad del cultivo de *Ricinus communis* L, con el fin de evaluar el rendimiento de aceite que se puede extraer en toneladas por hectárea.

Delimitación del área de estudio

El estudio se realizó en los terrenos de cultivos de Higuierilla, tomando en cuenta el diseño experimental del tamaño de parcelas en los cultivos agrícolas por Vargas y Navarro (2014), donde se delimitan tres áreas de 10m x 10m, pero para este caso de estudio, se procedió a delimitar tres parcelas (A, B y C) de 5m x 5m (Figura 2), puesto a que, la topografía del terreno donde se encontraba el cultivo tenía pendientes (ver Anexo 1) y era complicado el estudio muestral, por lo tanto se dificultaba la movilidad y la cosecha de los racimos de la planta presente en cada parcela. También, se contó el número de individuos existentes por cada unidad de área.

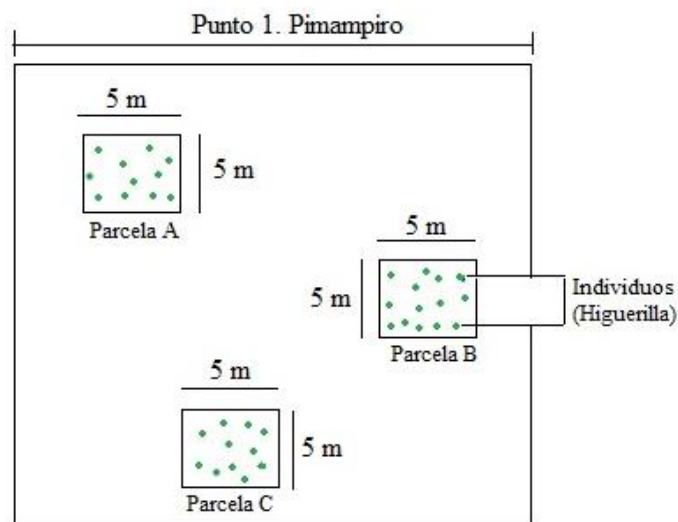


Figura 2. Ilustración demostrativa de la delimitación del área de estudio

Las parcelas fueron ubicadas al azar, este proceso se hizo para cada uno de los puntos de estudio, tomando en cuenta que no haya otros tipos de cultivos asociados. Para esto, primero se fijó una estaca como punto de partida y guía para fijar las demás a una

distancia de cinco metros hasta formar un cuadrado, limitado por una piola naranja con el fin de visualizar con facilidad. Luego, para la medición de los cinco metros exactos de punto a punto, se utilizó un flexómetro, como se aprecia en la Figura 3.



Figura 3. Delimitación del área de 5x5 m² del cultivo de higuera

Fenología

Para el estudio fenológico de las semillas de higuera, primero se tomó un punto de estudio por cada zona como referencia, tomando en cuenta las variables de temperatura y precipitación, datos proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2019). Por lo tanto, el punto ubicado en la parroquia Juncal pertenece a las zonas óptimas y el punto del cantón Cotacachi a las zonas no óptimas. Luego, mediante la observación directa in situ, cada quince días se realizó el seguimiento del tiempo que conlleva el desarrollo de las semillas de Higuera, tomando en cuenta las diferentes etapas como: floración están ubicada en la panícula, las flores femeninas se localizan en la parte superior y las masculinas en la parte inferior (Figura 4 a), en el fruto joven se observa una cápsula globosa con pedicelo alargado

con tres lóculos, generalmente espinoso de color verdes (Figura 4 b) y por último el fruto maduro es cuando se vuelven de color café y forma leñosa (Figura 4 c).

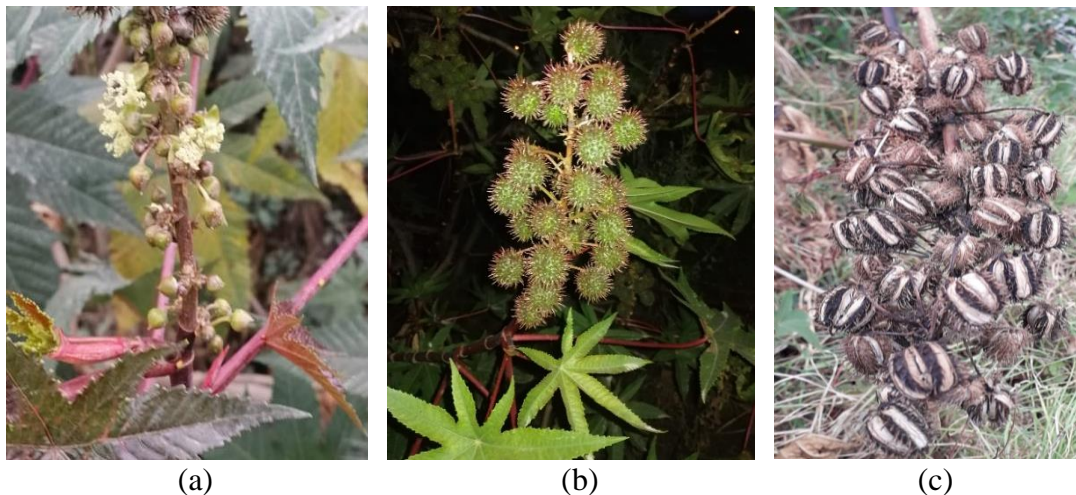


Figura 4. Fases fenológicas de las semillas de higuera

Cosecha

Esta operación se hizo manualmente utilizando guantes por lo que la planta contiene acúleos (espinas). También, con la ayuda de tijeras podadoras, se cortó los racimos de higuera, esto, se realizó cuando los frutos estaban completamente maduros, es decir, cuando toman un color café y están en su totalidad secos (Figura 5). Por último, los racimos, se colocaron en costales para evitar la pérdida de las semillas, puesto a que se corre el riesgo de que se hayan desgranado o se desgranen al tirarlos al suelo.



Figura 5. Recolección de los racimos de higuera.

Desgrane

Los racimos se recogieron secos de la planta, por lo tanto, un gran porcentaje de las capsulas fueron dehiscentes y se desgranaron naturalmente luego de exponerlas al sol aproximadamente 16 horas (Figura 6), pero fue necesario cubrir con plástico el recipiente que los contenía para evitar la pérdida de los granos, ya que la capsula se abre explosivamente y éste es empujado violentamente. Por otro lado, las variedades indehiscentes restantes, se desgranaron manualmente, con la ayuda de alicates (pinzas) y tijeras.



Figura 6. Desgrane de las capsulas de las semillas

Limpieza

Para eliminar de las semillas los residuos, basura y otras impurezas que se acumularon durante el proceso de la cosecha y desgrane, primero se procedió a colocarlas en un recipiente de plástico, seguidamente se aventó, donde, por diferencia de pesos las impurezas salieron volando, quedando sólo las semillas completamente limpias en el recipiente (Figura 7).



Figura 7. Semillas de higuierilla totalmente limpias

Secado

Se toma tres muestras de las semillas de Higuierilla de cada punto de estudio, cada una con un valor exacto de 100g. Estas muestras son llevadas al Laboratorio de Investigaciones Ambientales (LABINAM) y sometidas a un proceso de secado por estufa de marca Memmert, a 105°C (Figura 8), conjuntamente se realiza mediciones de masa cada dos horas hasta lograr un peso estable. Los datos obtenidos son tabulados en una hoja de Excel con el fin de obtener la curva de secado y determinar el valor de toneladas secas de biomasa por hectárea juntamente con la cantidad de humedad que pierde al someter las muestras a un secado por estufa.



Figura 8. Secado por estufa de las semillas de higuera

La obtención del porcentaje de contenido de humedad se realizó por diferencia de pesos utilizando la ecuación (1) de Cornejo y Estrada (2012) mencionada anteriormente.

Morfometría

De acuerdo con la International Seed Testing Association (ISTA, 2005), de forma aleatoria, de cada zona monitoreada y del total de semillas recolectadas, se tomaron 100 muestras al azar por cada punto específico de estudio tanto óptimas como no óptimas. Luego, basándose en la metodología de Leython (2008), con el uso de un calibrador pie de rey marca Solingen, se tomó medidas del largo que consta desde el extremo hilar hasta el calazal, también se midió el ancho y grosor, en la porción media y más ancha de la semilla como podemos apreciar en la Figura 9. Por último, se hizo un promedio para obtener un valor total por cada variable (largo, ancho y grosor).

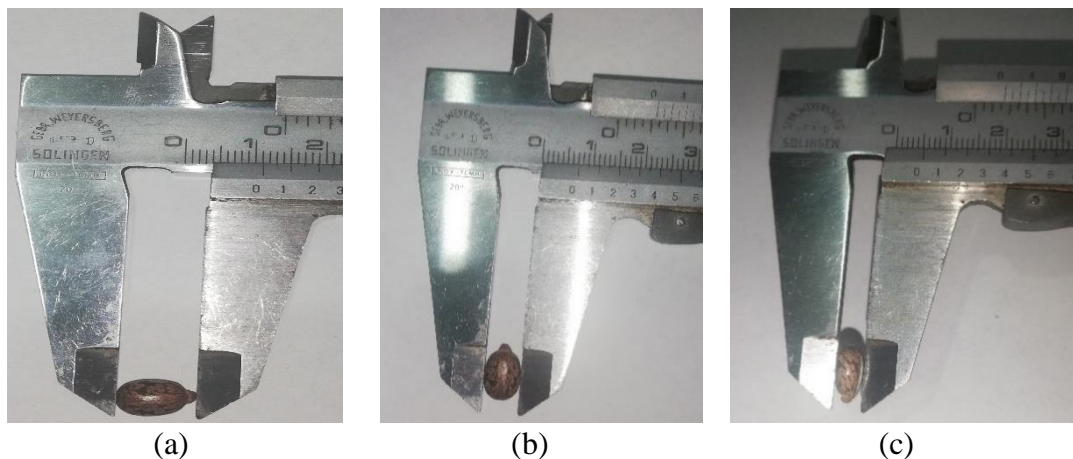


Figura 9. Análisis morfométrico de las semillas. La figura a, corresponde la media del largo, la imagen b muestra la medida del ancho y por último la c, indica la toma de medida del grosor.

Trituración

Por cada punto se utilizó 100 g de semillas, las muestras fueron trituradas utilizando un molino mecánico modelo Corona del Laboratorio de Investigaciones FICAYA (Figura 10). Garantizando un triturado uniforme, con el fin de que el solvente a utilizar tenga mayor facilidad al momento de la extracción del aceite.



Figura 10. Semillas de higuera previo a su trituración

3.2.2. Cuantificación el aceite de higuera de las diferentes zonas tanto óptimas como no óptimas de cultivo

La extracción del aceite de higuera no se puede extraer con simplemente triturarlo, por lo que se llevó a cabo un proceso de extracción el cual permita despojar a la semilla del aceite que se encuentra contenida en ella, por lo tanto, se realizó mediante dos metodologías con la finalidad de hacer una comparación entre los rendimientos obtenidos.

Extracción de aceite mediante fluidos supercríticos

La obtención de los aceites de semillas higuera se realizó en el Área de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador, mediante la aplicación de la tecnología de extracción con fluidos supercríticos bajo diferentes condiciones de presión y temperatura. Para lograrlo, se manejó un equipo Spe-ed SFE System, como se muestra en el diagrama de proceso (Figura 11), y se utilizó CO₂ como solvente.

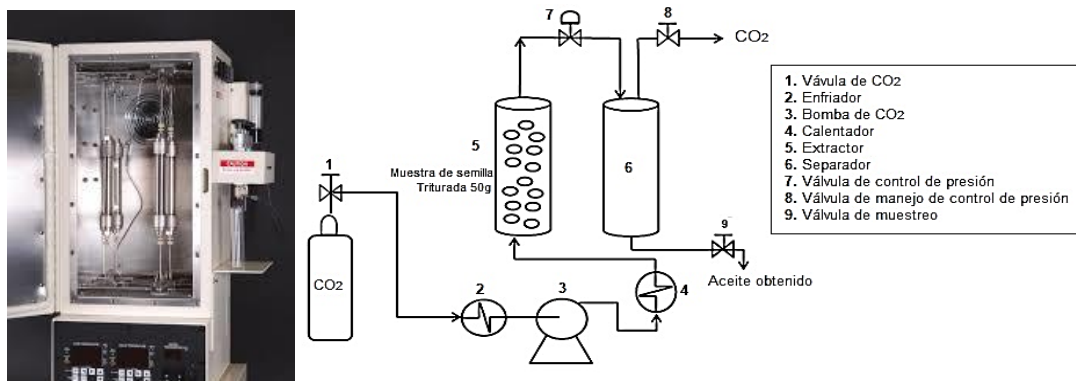


Figura 11. Diagrama de equipo de extracción con fluido supercrítico

El proceso extractivo se llevó a cabo utilizando una carga de 50 g de semillas previamente trituradas (Figura 12 a), intervalos de presión de 350 a 400 bares, y temperatura de ebullición del solvente de 80°C, manteniendo un flujo constante de 10 ml CO₂/min y un tiempo estático de 25 minutos y dinámico de 60 minutos. Estos valores se determinaron basándose en la cinética del proceso y estudios preliminares de esta investigación (Anexo 17). El aceite obtenido se colectó y almacenó en un vial de vidrio (Figura 12 b) hasta su posterior análisis. El rendimiento fue calculado mediante la ecuación 5, y se expresó como porcentaje de aceite extraído.

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso aceite extraído}}{\text{Peso semilla utilizada}} * 100 \quad (5)$$



(a)



(b)

Figura 12. Muestras de extracción con FSC

Extracción de aceite mediante equipo soxhlet

En el Laboratorio de Investigaciones de la FICAYA de la Universidad Técnica del Norte, se procedió a realizar la extracción de aceite que poseen las semillas de Higuierilla, con el fin de conocer su rendimiento el cuál consistió en un lavado constante del solvente con el fin de separar el aceite del material sólido.

Primero, se pesó y colocó la cantidad de 50 g de torta de Higuierilla previamente triturada en el dedal (Figura 13 a) que es un cartucho poroso el cual se lo cubrió con un tapón de algodón para que la muestra no se escape durante el proceso, luego se instaló los equipos Soxhlets y el refrigerante el cual posee la capacidad de enfriar el agua para evitar el sobrecalentamiento del sistema a una temperatura de 14°C.

Después, introducimos los dedales en la cámara de extracción, y como solvente orgánico se utilizó 250 ml de Hexano éste se lo colocó en un balón volumétrico que estuvo en contacto con una estufa eléctrica marca Umco, y permitió el calentamiento del solvente a su punto de ebullición de 68°C, el vapor ascendió por el tubo lateral y se condensa en el refrigerante, cayendo sobre las muestras (Figura 13 b), este proceso se dejó actuar por un tiempo aproximado de 5 horas.

Al finalizar el tiempo, se retiró los dedales y se extrajo los restos de semillas ya deshidratadas. También, se recuperó al máximo el solvente para ser reutilizado en las demás muestras. Cabe mencionar, que se decidió realizar con el solvente hexano ya que es más económico y el aceite extraído es de mejor calidad a comparación de otros solventes orgánicos según estudios previos.

Por último, para separar el aceite del solvente se recolecto en un vaso de precipitación y se dejó reposar la muestra por 48 horas, en donde el solvente se evapora y el aceite queda en el vaso (Figura 13 c), una vez evaporado el disolvente se midió el aceite obtenido en una probeta cónica graduada y se lo recolecto en recipientes de vidrio (Figura 13 d) se midió la muestra en mililitros, los datos obtenidos son tabulados en una hoja Excel.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 13. Extracción de aceite mediante equipo Soxhlet.

3.2.3. Obtención del biodiésel mediante la transesterificación

La obtención del biodiésel se lo realizó a nivel laboratorio, primero en un tubo de ensayo se disolvió 0.026g del catalizador Hidróxido de Sodio (NaOH) granulado en 1.35ml de alcohol Metanol (CH_3OH) previamente medido en una probeta, para convertirlo en metóxido de sodio, el cuál debe dar un pH de 11 (Figura 14).



Figura 14. Determinación de pH del Metóxido de Sodio

Luego, como reactor se utilizó un vaso de precipitación de 25 ml porque se usó cantidades muy pequeñas para la obtención de biodiésel. Entonces, en éste se añadió 6.83 ml de muestra de aceite de higuera con el metóxido de sodio, se colocó a baño maría hasta que alcance un rango de temperatura entre los 40°C a 50°C, se procedió a agitar mecánicamente en un promedio de 1000 rpm a 1500 rpm durante un lapso de una hora (Figura 15 a).

Es importante ir midiendo el pH de la mezcla el cual debe ir bajando constantemente hasta llegar a un pH neutro, una vez culminado el proceso de transesterificación, es necesario dejar reposar la mezcla por 8 horas. Al finalizar, el proceso el pH del biodiésel debe ser de 6,5 a 7 (Figura 15 b), por lo tanto, en este caso no se procedió a realizar el lavado por saponización.

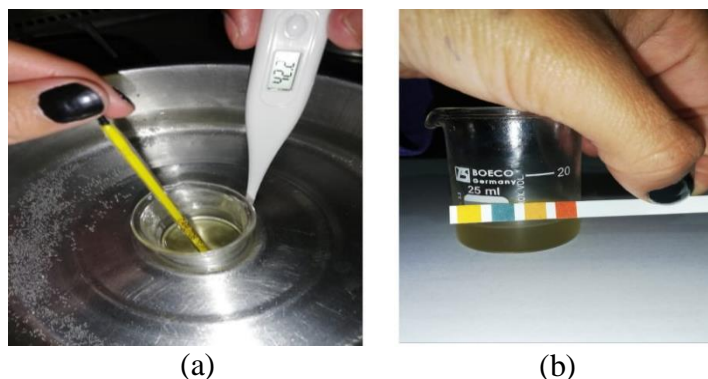


Figura 15. Proceso de transesterificación y obtención de biodiésel.

Cabe recalcar, que el biodiésel antes obtenido es puro es decir B100, mediante la centrifugación se obtuvo B5 que consiste en la relación de mezclas del 95% del diésel convencional en este caso se usó diésel Premium (Figura 16) y 5% de biodiésel del aceite de Higuierilla.



Figura 16. Mezcla del 5% B100 con 95% diésel premium

3.2.4. Zonificación para el cultivo de higuierilla

Para el desarrollo de este trabajo, es necesario saber el total de hectáreas de cultivo de Higuierilla de las zonas óptimas y no óptimas, con el fin de saber la producción de biodiésel B5 que se puede obtener en la provincia de Imbabura.

Zonas óptimas

Basándose, en el estudio realizado por Velalcázar (2018), donde observó que las zonas óptimas de cultivo de Higuierilla están distribuidas por toda la provincia en pequeñas extensiones de terreno, tomó en cuenta condiciones edafoclimáticas requeridas por la planta como temperatura (Anexo 2), precipitación (Anexo 3), pH (Anexo 4), textura

del suelo (Anexo 5) y pendientes (Anexo 6), de igual manera áreas protegidas (Figura 18) y cobertura del uso del suelo (Anexo 8) en la provincia de Imbabura.

Por lo tanto, utilizó el software Arc-Map para la elaboración de los mapas y creó tres escenarios, en primera instancia el denominado “Óptimo”. Un segundo escenario llamado “Óptimo (cultivos asociados)” el cual adicionó al trabajo la posibilidad de la coexistencia de la higuierilla con cultivos temporales. Finalmente, un tercero en donde solamente tomó en cuenta las condiciones climáticas, obteniendo así una suma total de 349.9 hectáreas óptimas para cultivo de Higuierilla en la provincia (figura 17).

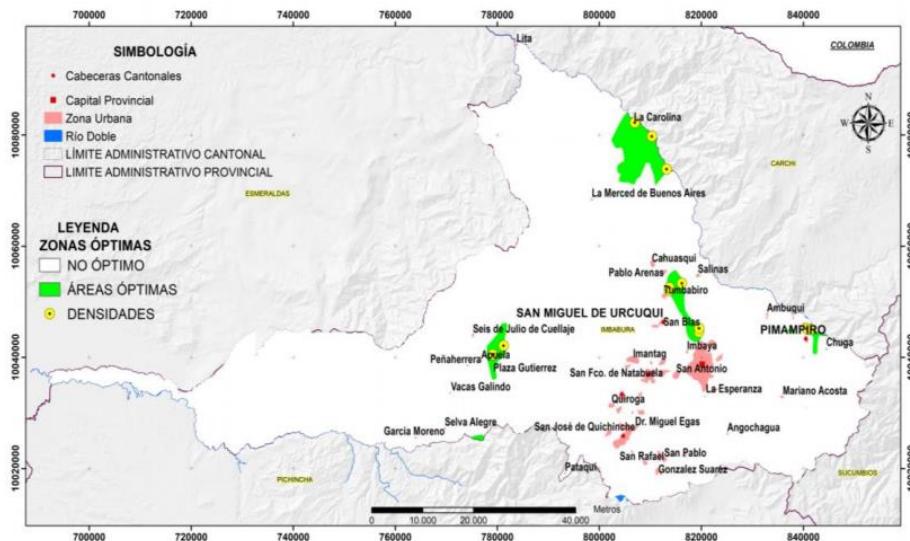


Figura 17. Zonas óptimas para el cultivo de higuierilla. Realizado por Velalacazar, 2018.

Asimismo, realizó la validación de densidades de cultivo de Higuierilla en los tres escenarios de estudio antes mencionados. Las localizaciones se detallan en la tabla 3 juntamente con el área de cada punto. De los cuales, para el presente estudio se tomó los tres puntos óptimos con más densidades de cultivo de Higuierilla en la provincia estos fueron los puntos 5 (Anexo 8), punto 7 (Anexo 9), y punto 15 (Anexo 10).

Tabla 3
Ubicación Geográfica del Muestreo

| Localización | Punto N° | Área (m ²) |
|------------------------------|----------|------------------------|
| Priorato | 1 | 10 |
| Priorato | 2 | 10 |
| Priorato | 3 | 16 |
| Autopista Ibarra - El Juncal | 4 | 30 |
| Autopista Ibarra - El Juncal | 5 | 36 |
| Vía a Tumbabiro | 6 | 10 |
| Vía a Tumbabiro | 7 | 15 |
| Tumbabiro | 8 | 10 |
| La Carolina | 9 | 21 |
| La Carolina | 10 | 10 |
| La Carolina | 11 | 12 |
| Pucará | 12 | 10 |
| Pucará | 13 | 10 |
| Pimampiro | 14 | 10 |
| Pimampiro | 15 | 32 |

Nota. Velalcazar (2018).

Zonas no óptimas

Para el desarrollo de este trabajo, se pudo identificar también el total de hectáreas de cultivo de Higuerilla en ciertas zonas de la provincia de Imbabura que no cumplen con las condiciones edafoclimáticas requeridas para el desarrollo de la planta, según el estudio realizado por Velalcázar (2018), estos parámetros son: pH del suelo de 5.5 a 7.0, pendiente de 12%, altura hasta 2 500 msnm, precipitaciones de 400 a 1 500 mm, temperatura de 19°C a 30°C y zona de vegetación arbustiva. Para esto, primero se realizó una inspección in situ de los cultivos de higuerilla en zonas que no se considera óptimas obteniendo así las coordenadas por cada punto de estudio (Anexos 11, 12 y 13). Luego, mediante la utilización de los softwares ArcMap 10.5 y Google Earth Pro se procedió a georrefenciar los datos para determinar el total de hectáreas de cultivos de higuerilla existente en estas zonas. Se tomó en cuenta los mismos parámetros de las

zonas óptimas, como se puede observar en la Figura 18, se obtuvo un valor total de 218 ha para cultivar higuierilla en la provincia de Imbabura.

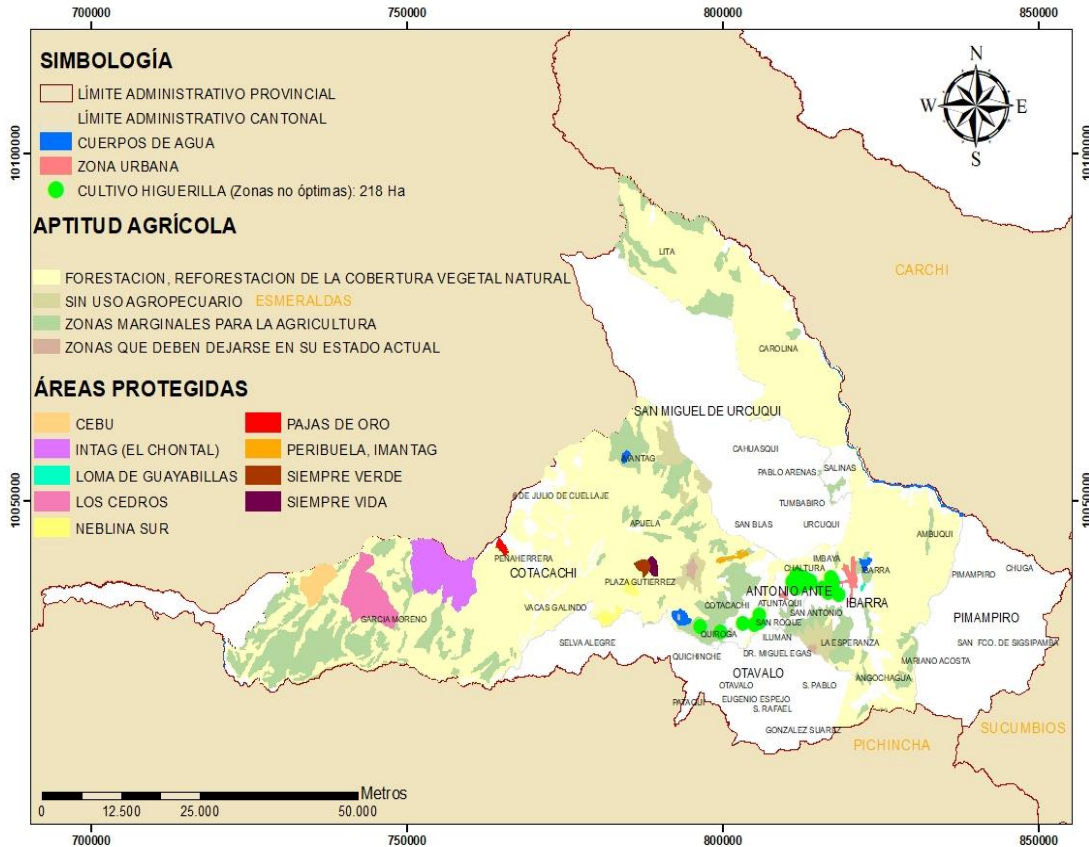


Figura 18. Zonas no óptimas para el cultivo de higuierilla

3.3. Materiales y Equipos

En la tabla 4, que se muestra a continuación, detalla los materiales y equipos utilizados en cada uno de los procesos de cada objetivo de la investigación. tanto en la experimentación realizada en el campo como en los diferentes análisis desarrollados en los laboratorios. La tabla está dividida en dos partes, el primero corresponde a los materiales y equipos, y el segundo a la marca que poseen los aparatos.

Tabla 4

Materiales y equipos utilizados en el análisis de extracción de aceite de higuera y obtención de biodiésel

| Materiales y Equipos | Marca |
|---------------------------------------|-------------------|
| GPS | Garmin |
| Balanza digital | Sartorius |
| Pirola color naranja | |
| Flexómetro | |
| Estacas de madera | |
| Tijeras podadoras | |
| Guantes | |
| Estufa | Mermmet |
| Molino mecánico | |
| Calibrador pie de rey | Solingen |
| Cartuchos porosos (dedal) | |
| Vasos de precipitación | |
| Solventes (Hexano y CO ₂) | |
| Alcohol (Metanol) | |
| Catalizador (NaOH) | |
| Estufa eléctrica | Umco |
| Equipo Soxhlet | |
| Equipo FSC | Spe-ed SFE System |

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el presente capítulo se muestra los resultados de los estudios y análisis de cada uno de los objetivos propuestos, mediante tablas y gráficas para una mejor comprensión detallada con el fin de explicar el propósito de este tema de investigación.

4.1. Análisis morfométrico de las semillas de higuera (*Ricinus communis* L.) provenientes de zonas cultivadas tanto óptimas y no óptimas de la provincia

En la investigación fueron definidos seis puntos aleatorios dentro de la provincia de Imbabura, para una mejor comprensión se otorgó a cada punto la siguiente codificación:

Zonas óptimas

- R.C.Jun (*Ricinus communis* L. Juncal)
- R.C,Pim (*Ricinus communis* L. Pimampiro)
- R.C.Urcu (*Ricinus communis* L. Urcuquí)

Zonas no óptimas

- R.C.Cota (*Ricinus communis* L. Cotacachi)
- R.C.Iba (*Ricinus communis* L. Ibarra)
- R.C.Chal (*Ricinus communis* L. Antonio Ante)

4.1.1. Delimitación del área de estudio

En Imbabura, se distingue una gran producción de higuera (*Ricinus communis* L.) para las zonas óptimas cuenta con un área total de cultivo de 349.9 ha, según estudio realizado por Velalcázar (2018) y para las zonas no óptimas cuenta con 218 ha, según

dato obtenido de la delimitación del área de estudio mediante el uso del software Arcgis 5.0 (Figura 18). Los cultivos de Higuierilla podrían ser explotados con el fin de producir biodiésel.

La tabla 5, muestra el número de individuos que hubo en las parcelas de 5 x 5 m² (A, B y C) por cada punto de estudio tanto para las zonas óptimas y no óptimas de cultivo de higuierilla. Así, para las zonas óptimas se presentó mayor rendimiento de semillas en el punto R.C.Pim de 156 individuos se obtuvo 1 235 g (anexo 16), y en una hectárea 164.7 kg. Para, el punto R.C.Jun de 145 individuos se extrajo 932 g y 124.3 kg en una hectárea. Finalmente, en el punto R.C.Urcu de 97 individuos se recogió 890 g de semillas de 129 individuos, y 118.7 kg en una hectárea.

Igualmente, en las zonas no óptimas en el punto R.C.Cota se obtuvo mayor rendimiento de semillas con un total de 654 g extraídos de 101 individuos y 87.2 kg equivalentes a una hectárea. En el punto R.C.Iba hubo 97 individuos consiguiendo 598 g de semillas y 79.7 kg por hectárea. Por último, en el punto R.C.Iba hubo menor cantidad de individuos por lo tanto solo se adquirió 476 g y en una hectárea 63.5 kg. Cabe destacar, que el tipo de Higuierilla que se estudió en esta investigación es de clase verde.

Por otro lado, en cuanto al rendimiento de la semilla obtenida es muy bajo a diferencia de lo que obtuvieron Rivera y Hernández (2016) en donde el menor rendimiento fue de 860 kg/ha, y el mayor rendimiento de 2 377 kg/ha. Asimismo, Rendón y Triviño (2009) obtuvieron un promedio de producción de semilla de 375 kg/ha. El bajo rendimiento obtenido, se debe a que las semillas cosechadas fueron de plantas desarrolladas de forma silvestre, es decir, no se realizó la siembra de la planta.

Tabla 5
Biomasa total obtenida por zonas

| Zonas óptimas | | | | | | |
|-------------------------|----|----|----|------------------|----------------------|--------------------------|
| Puntos de cultivo | A | B | C | Total individuos | Biomasa Extraída (g) | Biomasa Extraída (Kg/ha) |
| R.C.Pim | 47 | 52 | 57 | 156 | 1 235 | 164.7 |
| R.C.Jun | 48 | 46 | 51 | 145 | 932 | 124.3 |
| R.C.Urcu | 43 | 58 | 28 | 129 | 890 | 118.7 |
| Zonas no óptimas | | | | | | |
| R.C.Cota | 31 | 27 | 43 | 101 | 654 | 87.2 |
| R.C.Iba | 26 | 37 | 34 | 97 | 598 | 79.7 |
| R.C.Chal | 23 | 28 | 27 | 78 | 476 | 63.5 |

Por lo tanto, en la Tabla 6 se aprecia los rendimientos de semillas de Higuierilla que se pueden obtener tanto para las zonas óptimas como las no óptimas. Resultando, una mayor producción de estas semillas en las zonas óptimas, un total de 47.54 toneladas, este valor es proporcional al área de cultivo que es mucho más grande a diferencia de las zonas no óptimas que presentó un total de semillas de 16.74 toneladas. La obtención de estos datos es muy importante para luego analizar la producción total de biodiesel que podamos obtener.

Tabla 6
Biomasa total obtenida

| Zonas | Total Cultivo (ha) | Semillas Obtenidas (tn) |
|------------|--------------------|-------------------------|
| Óptimas | 349.9 | 47.54 |
| No Óptimas | 218 | 16.74 |

4.1.2 Fenología de las semillas de higuierilla

La Figura 19, expone la fenología de las semillas de especie *Ricinus communis* L en el punto de referencia de las zonas óptimas, en relación a la temperatura y precipitación demuestra que, la floración se manifestó durante un periodo de dos meses y medio aproximadamente, en donde se apreció una temperatura y precipitación promedio de 19.1°C y 71.3 mm respectivamente.

Luego, se observó un descenso de estas variables meteorológicas lo que se presume que el tiempo que conlleva a formación de los frutos jóvenes es de un mes, y después de medio mes fue posible la observación de fruto maduros, permitiendo la recolección de las semillas de Higuierilla a una temperatura de 19°C y precipitación de 48mm correspondientes a la temporada seca, siendo posible realizar dos cosechas de semillas durante el año.

El tiempo total de desarrollo de las semillas de Higuierilla para la primera cosecha conllevó aproximadamente 105 días desde la etapa de floración y para la segunda cosecha fue después de 95 días puesto a que hubo un incremento de temperatura y precipitación favoreciendo al desarrollo de las semillas.

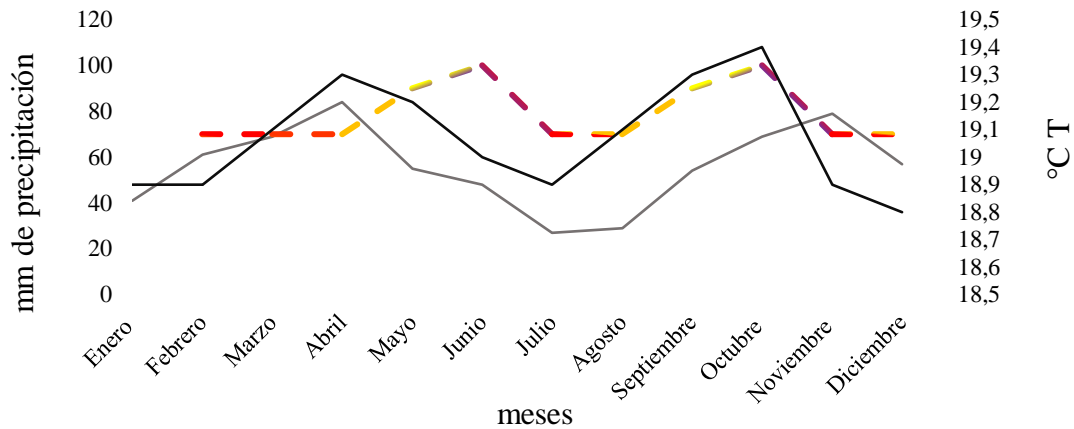


Figura 19. Fases del desarrollo de las semillas de higuierilla (*Ricinus communis* L) en las zonas óptimas. En la figura se observa el tiempo en meses que conlleva el cambio de fases del desarrollo de las semillas de higuierilla, que están representadas por una línea entre cortada, donde rojo muestra la fase de floración, el amarillo es la fase de fruto joven y por último el morado indica la fase de fruto maduro idóneo para cosechar. Estas fases, se relacionan con la temperatura simbolizada por la línea negra y la precipitación por la línea gris.

En cambio, para el punto de referencia de las zonas no óptimas, mediante la figura 20 se puede observar que el rango de temperatura es mucho menor al de las zonas óptimas por ende el desarrollo de las semillas es más tardía, así, para la etapa de floración conllevó aproximadamente tres meses a una temperatura de 15.3°C y precipitación de 111mm. Después de este período se fueron formando los frutos jóvenes completando la fase en dos meses para posteriormente en medio mes presenciar la etapa de maduración de los frutos, permitiendo la recolección de estos a una temperatura y precipitación de 14.7°C y 16 mm respetivamente.

Cabe recalcar que en las zonas no óptimas el tiempo que se desarrollaron las semillas fue de 150 días desde el inicio de la fase de floración para obtener la primera cosecha, y para la segunda cosecha fue después de 120 días, hubo un ascenso de las variables meteorológicas permitiendo acelerar el proceso de formación de las semillas.

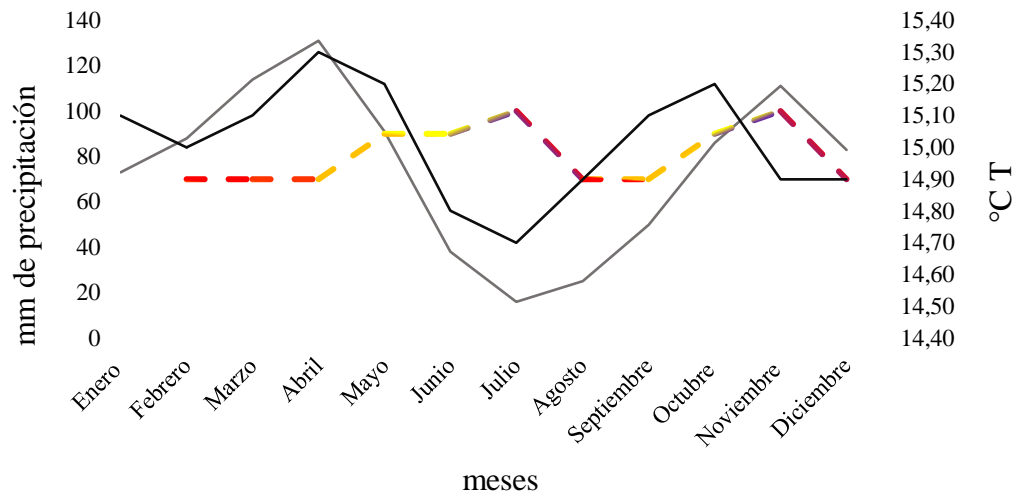


Figura 20. Fases del desarrollo de las semillas de Higuierilla (*Ricinus communis* L) para las zonas no óptimas. El comportamiento de las semillas es similar al de las zonas óptimas.

Los datos obtenidos, mencionados anteriormente, coinciden con Redón y Triviño que obtuvieron la primera cosecha a los 120 días desde la etapa de floración y su segunda cosecha a los 60 días después. Así mismo, Leal y Jiménez (2009) realizaron su estudio en Ambuquí donde recolectaron la primera producción de semillas a los 120 días desde la fase de floración o a los 150 días desde su siembra.

4.1.3. Secado

La Figura 21, pertenece a las muestras de semillas sin triturar en conjunto e indica el tiempo de secado a una temperatura de 105°C (Anexo 14), la misma que tuvo una duración de 24 horas hasta la estabilización de secado. En el intervalo de 2 horas se evidencia una mayor intensidad de evaporación que disminuye del 100 % al 60 %. A partir de 600 minutos (8 horas) se registran pesos constantes indicando la ausencia de humedad. Las tecnologías para el secado pueden ser desarrolladas y/o mejoradas en base a esta información. En la mayoría del secado se reduce la humedad de las semillas de aceite por debajo del 10 % dato que coincide con la literatura de Vallejos (2016) que realizó el secado colocando las semillas al sol con una adecuada ventilación o aireación.

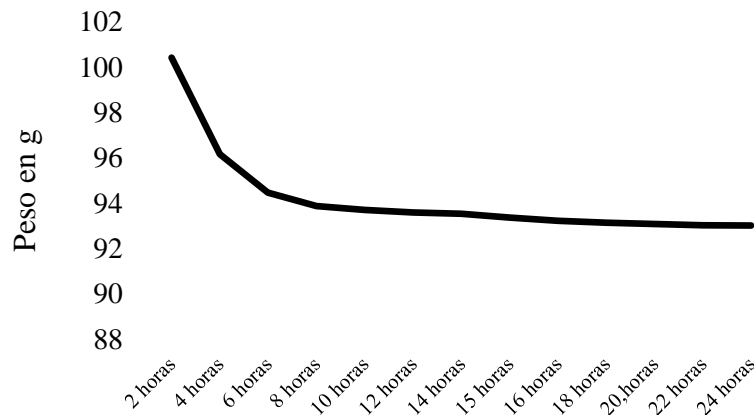


Figura 21. Curva de secado de las semillas de higuierilla

4.1.4. Morfometría de las semillas

Las semillas de higuera tienen forma elipsoide grandes, lisas y brillantes, de color pardo rojizo, con pintas de color café o gris (Anexo 15). Los datos del ancho, grosor y largo, medidos con el Pie de Rey, se muestran en la Tabla 7 para cada uno de los puntos de las zonas óptimas y no óptimas. Donde, en relación a la variable ancho, las semillas con mayor tamaño se presentó en las zonas no óptimas correspondiente al punto de R.C.COTA con un valor promedio de 0.94 cm y con menor tamaño en las zonas no óptimas en el punto R.C.URCU con un tamaño de 0.68 cm. También, con respecto a la variable grosor, de igual manera el punto R.C.COTA presentó la mayor medida que fue de 0.66 cm, y las semillas de los puntos R.C.PIM y R.C.CHAL fueron las que obtuvieron medidas pequeñas de 0.51 cm pertenecientes a las zonas óptimas y no óptimas respectivamente. Por último, para la variable largo, el punto R.C.IBA de las zonas no óptimas mostró medidas de 1.38 cm siendo la más grande en este aspecto, y 1.06 cm expuso el punto R.C.URCU de las zonas óptimas, resultando tener la proporción de largo más pequeña. Los valores que se mencionaron anteriormente se encuentran dentro del rango establecido por Correa (2014) que van desde 0.6 cm a 1.1 cm para la variable ancho, de 0.4 cm a 0.6 cm para la variable grosor y finalmente, la variable larga comprende valores desde 0.9 cm a 1.5 cm.

Tabla 7
Datos morfométricos de semillas

| Código | Ancho (cm) | Grosor (cm) | Largo (cm) |
|------------------|------------|-------------|------------|
| Zonas no óptimas | | | |
| R.C.IBA | 0.82 | 0.56 | 1.38 |
| R.C.CHA | 0.71 | 0.51 | 1.14 |
| R.C.COTA | 0.94 | 0.66 | 1.31 |
| Zonas óptimas | | | |
| R.C.PIM | 0.70 | 0.51 | 1.10 |
| R.C.JUN | 0.74 | 0.52 | 1.16 |
| R.C.URCU | 0.68 | 0.58 | 1.06 |

Por lo tanto, para una mejor comprensión de lo que se explicó anteriormente se muestra en la figura 22 el resultado general de las tres variables. El punto R.C.COTA sobresale a diferencia de los otros puntos en relación al ancho y grosor de las semillas, y en la variable largo el punto que más se destaca es R.C.IBA.

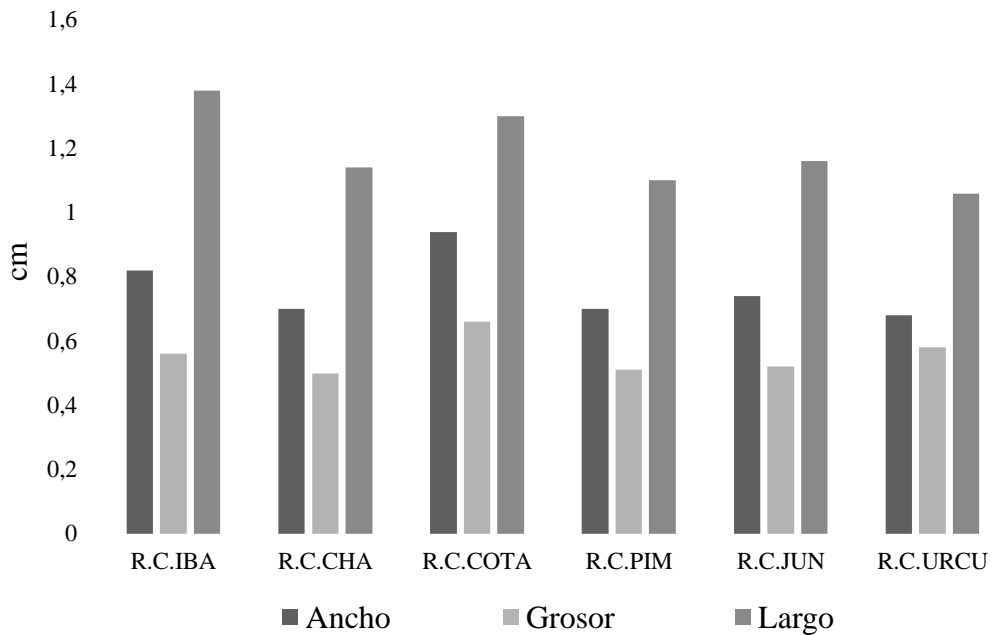


Figura 22. Variables de medida de las semillas de higerilla

4.2. Cuantificación del aceite de higerilla en las diferentes zonas de cultivo, tanto óptimas como no óptimas

Con el fin de comparar rendimientos de aceite de higerilla, a continuación, se muestran los valores de obtenidos de éstos, después de emplear dos diferentes metodologías de extracción, por cada punto de estudios de las zonas de cultivo, óptimas y no óptimas de la provincia de Imbabura.

4.2.1. Rendimiento de aceite mediante la metodología fluidos supercríticos

Los resultados del rendimiento de la extracción con CO₂SC, bajo diferentes condiciones de presión y temperatura, se observan en la Tabla 8. El mayor rendimiento de aceite a nivel experimental fue de 2.51% obtenido a una presión de 400 bar y 80°C. Este rendimiento fue mayor al reportado por Castro et al. (2011), quienes obtuvieron un rendimiento del 1.40% al trabajar a 300 bar y 40°C, en la extracción del aceite. Sin embargo, los autores reportan un significativo aumento de este porcentaje cuando emplearon etanol como cosolvente en la extracción, con lo cual obtuvieron un 17.30%, rendimiento superior al reportado en esta investigación.

También, el rendimiento obtenido es muy bajo a comparación con el estudio de Pantoja (2016), en donde su mejor rendimiento de aceite obtenido fue del 22.2% a 275 bar y 50°C temperatura. Esta diferencia en el rendimiento puede deberse a que las semillas no fueron previamente trituradas o también a las condiciones edafoclimáticas de donde proceden las semillas, lo cual está directamente relacionado con su composición química Espinoza et al. (2019), y a las diferencias en las condiciones de extracción del CO₂, además de utilizar etanol como co-solvente en la extracción.

Tabla 8
Rendimientos de aceite extraído mediante FSC

| Muestra | Masa ingresada (g) | Masa Extracto (g) | Rendimiento (%) |
|-----------|--------------------|-------------------|-----------------|
| R.C. IBA | 50.79 | 1.26 | 2.51 |
| R.C. COTA | 50.48 | 0.79 | 1.57 |
| R.C. CHAL | 50.08 | 1.26 | 2.51 |
| R.C. URCU | 50.12 | 0.78 | 1.56 |
| R.C. JUN | 50.08 | 0.63 | 1.25 |
| R.C. PIM | 50.07 | 0.70 | 1.41 |

La Figura.23 indica los rendimientos de aceite extraídos mediante FSC, donde los puntos R.C.IBA y R.C.CHAL reflejan un mayor rendimiento de aceite con una valor igual al

2.51% éstas semillas pertenecen a las zonas no óptimas y con menor rendimiento es el punto R.C.JUN con un porcentaje del 1.25% pertenecientes a las zonas óptimas.

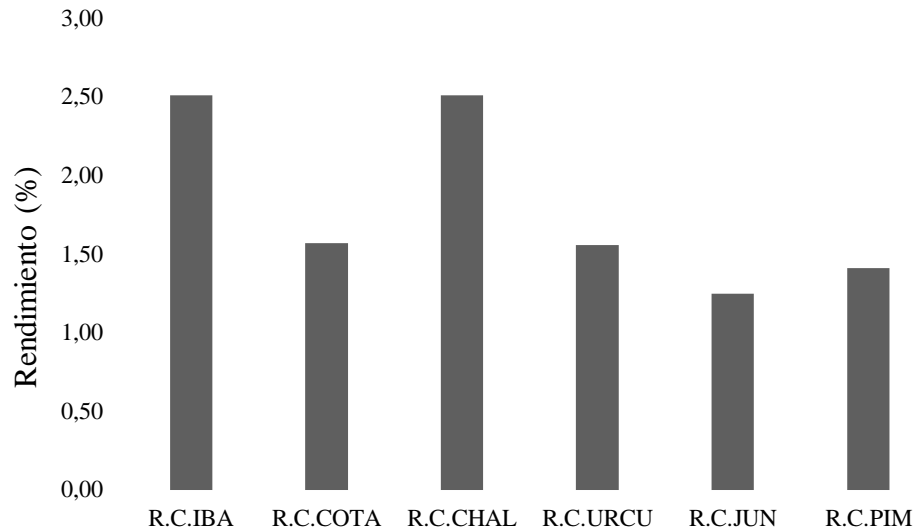


Figura 23. Rendimientos de aceite mediante la metodología FSC

4.2.2. Rendimiento de aceite mediante la metodología con solvente

Los resultados de rendimientos de la extracción utilizando el solvente orgánico Hexano, se observan en la Tabla 9. Donde el mayor rendimiento de aceite a nivel laboratorio fue de 19.06 % con un tiempo de 5 horas de proceso, este rendimiento fue menor al reportado por Villegas (2019) con 52% dato que coincide con lo obtenido por Rizzardo et al. (2012,) bajo las mismas condiciones anteriormente mencionadas. Sin embargo, el rendimiento de aceite que obtuvo Correa (2014) fue menor al de nuestro estudio con un porcentaje de 5.65 %. La diferencia en el rendimiento obtenido se debe a la cantidad de muestra inicial de semillas en gramos

Tabla 9

Rendimientos de extracción de aceite con equipo Soxhlet

| Código Muestra | Peso Muestra (g) | Aceite Extraído (g) | Rendimiento Aceite (%) |
|----------------|------------------|---------------------|------------------------|
| R.C.IBA | 50.781 | 6.00 | 11.82 |
| R.C.COTA | 50.535 | 9.63 | 19.06 |
| R.C.CHAL | 50.318 | 7.10 | 14.11 |
| R.C.URCU | 50.609 | 8.09 | 15.98 |
| R.C.JUN | 50.026 | 6.44 | 12.87 |
| R.C.PIM | 50.691 | 6.32 | 12.47 |

En la Figura 24, se aprecia los rendimientos de aceite obtenidos mediante la aplicación de la metodología Soxhlet con el uso de solvente orgánico hexano, en donde, el punto con mayor rendimiento es R.C.COTA perteneciente a las zonas no óptimas con un total del 19.06% y el punto con menor rendimiento es el punto R.C.IBA igualmente perteneciente a las zonas no óptimas.

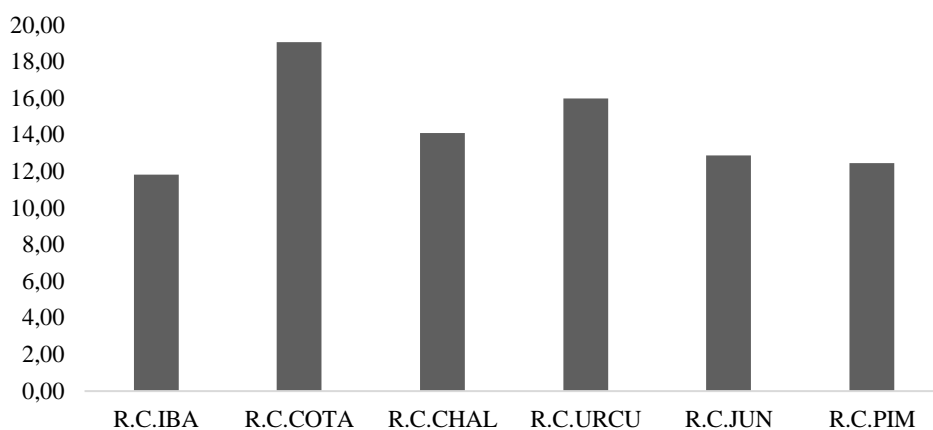


Figura 24. Rendimientos de aceite mediante la metodología Soxhlet

Por último, se encontraron diferencias significativas entre los dos métodos de extracción de aceite de semilla de *Ricinus communis* L., por lo tanto, la Figura 25 indica que los rendimientos obtenidos mediante solventes con equipo soxhlet, son mayores a comparación con los rendimientos obtenidos por fluidos supercríticos. La diferencia entre los rendimientos obtenidos con los datos reportados en literatura, se deben a las

discrepancias en los solventes empleados y que en el caso de extracción mediante FSC la semilla no fue previamente triturada.



Figura 25. Comparación de metodologías aplicadas en la obtención de aceite. a) rendimientos de aceite obtenidos a partir de solventes y b) rendimientos obtenidos por FSC.

4.3. Obtención de biodiésel mediante la transesterificación

En la Tabla 10, se indican los resultados de biodiésel obtenido mediante el proceso de transesterificación son directamente proporcional a la cantidad de aceite de higuierilla que se usó, donde, el mejor valor de producción fue de 7.10 ml B100 y 142 ml B5 relacionado a 7.50 ml de aceite de ricino. Cabe recalcar, que lo obtenido de B5 resultó de la mezcla del 5% de B100 con 95 % de diésel convencional.

Tabla 10
Cantidad de biodiésel obtenido mediante la transesterificación

| Código | Muestra de aceite (ml) | B100 (ml) | B5 (ml) |
|----------|------------------------|-----------|---------|
| R.C.IBA | 6.50 | 6.15 | 123 |
| R.C.URCU | 6.80 | 6.43 | 128.6 |
| R.C.COTA | 7.50 | 7.10 | 142 |
| R.C.PIM | 6.60 | 6.24 | 124.8 |
| R.C.CHAL | 6.90 | 6.53 | 130,6 |
| R.C.JUN | 6.70 | 6.34 | 126.8 |

En la Figura 26, se indican los rendimientos alcanzados de biodiésel a partir del aceite de ricino usando la metodología de transesterificación, donde, el mayor rendimiento obtenido en relación con la muestra de aceite fue del 94.7 % y es comparable con el estudio de Arancibia y Calero (2011), en el cual, prepararon biodiésel a partir de aceite de higuera, y obtuvieron un 98.4 % en rendimiento con NaOH como catalizador y con condiciones de reacción similares al presente estudio. La velocidad de agitación del reactor fue de 2000 rpm, mientras que en el presente trabajo se utilizaron 1000 rpm. Por lo anterior, los resultados se validan mutuamente, así como las condiciones de operación, donde la principal diferencia es el efecto de la velocidad de agitación (rpm).

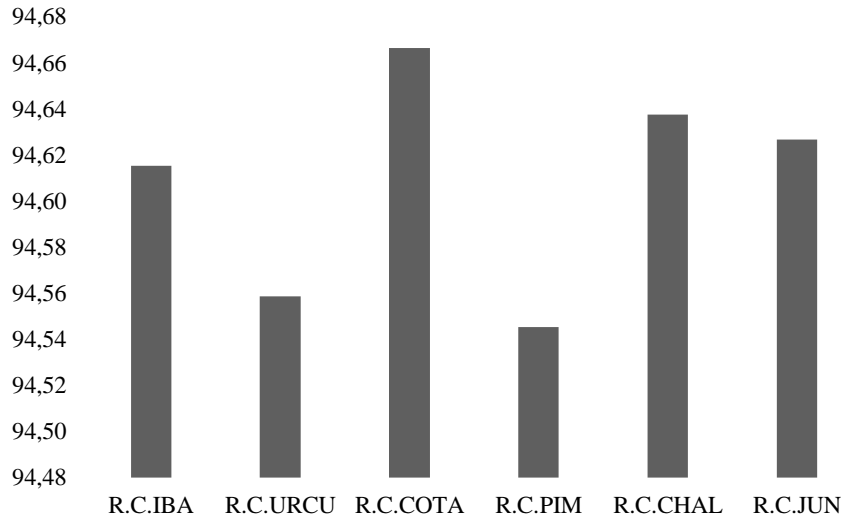


Figura 26. Obtención de rendimientos de biodiesel mediante la transesterificación

4.3 Producción total de aceite y biodiésel por superficie de cultivo

La cantidad de biodiésel que se puede obtener por hectárea de cultivo está directamente relacionada con el contenido de aceite y el rendimiento del cultivo por unidad de superficie. La Tabla 11 muestra que las zonas óptimas arrojaron una producción de aceite y biodiésel con valores de 0.019 tn/ha y 16.17 l/ha respectivamente, siendo

mayor a comparación de lo que obtuvo en las zonas no óptimas, esto se debe al alto rendimiento de semillas extraídas.

Por otra parte, los datos antes mencionados son muy bajos en comparación a lo obtenido por Mendoza & Reyes (2015) que obtuvieron una producción de aceite de higuera de 0.40 tn/ha y 1 320 l/ha de biodiésel. Así mismo, Espín (2016) realizó un estudio en la provincia de Imbabura en donde obtuvo un total de 694 litros por hectárea de biodiésel.

Tabla 10
Producción de biodiésel con respecto a una hectárea de cultivo

| Zonas | Rendimiento de semillas (kg/ha) | Producción aceite (tn/ha) | B100 (l/ha) | B5 (l/ha) |
|------------|---------------------------------|---------------------------|-------------|-----------|
| Óptimas | 135.9 | 0.019 | 16.17 | 323.54 |
| No óptimas | 76.80 | 0.011 | 9.13 | 182.6 |

Los resultados de la producción de aceite y biodiésel obtenidos por el total de la superficie de las zonas óptimas y no óptimas se muestran en la tabla 12, donde se aprecia que la mayor producción de aceite de higuera y biodiésel corresponden a las zonas óptimas siendo de 6.5 toneladas y 5 660.5 litros respectivamente. Y, en las zonas no óptimas solamente se obtuvo 2.4 toneladas de producción de aceite y 1 990.8 litros de biodiésel.

Tabla 11
Producción total de aceite y biodiésel (B100) superficie de estudio

| Zonas | Cultivo (ha) | Rendimiento semillas (tn) | Producción aceite (tn) | B100 (l) | B5 (l) |
|------------|--------------|---------------------------|------------------------|----------|-----------|
| Óptimas | 349.9 | 47.54 | 6.5 | 5 660.5 | 113 210.2 |
| No óptimas | 218 | 16.7 | 2.4 | 1 990.8 | 39 816.3 |

Por lo tanto, según la fenología de la planta, al año se puede realizar dos cosechas, por lo que el total de biodiésel a obtener en el año es de 4042.5 galones, este dato no cubriría con la demanda de biodiésel en la provincia de Imbabura para el escenario B5 ya que

Velalcázar (2018) estimó 1 584 094 galones aproximadamente al año. Esto puede deberse a la aptitud de cultivo y puesto a que una posible solución sería incorporar insumos agrícolas como fertilizantes y agroquímicos (SAGPyA, 2010)

También puede ser, por las condiciones edafoclimáticas de la región en donde se encuentran los cultivos, ya que la higuera puede crecer bajo diferentes situaciones e incluso en condiciones adversas, no obstante, eso no quiere decir que cualquier lugar en donde ésta se desarrolla sea favorable, para la implementación de la planta como cultivo energético, pues el rendimiento juega un papel crucial que puede condicionar el resultado de éste. Recalde y Durán (2009) sostienen que la higuera puede crecer en amplios rangos de las variables de temperatura, precipitación y altitud, resultado obtenido a partir de colectas botánicas en diferentes intervalos presuntamente determinados a criterio de los investigadores. Pero aquella aseveración no es concluyente, ya que hace alusión a una característica propia de la planta, la cual es cosmopolita y puede colonizar fácilmente cualquier espacio sea cultivable o no, por lo tanto, la delimitación de las zonas óptimas en donde la higuera debe ser cultivada para obtener los mejores rendimientos según sus requerimientos climáticos y edáficos constituyen una guía en proyectos relacionados con el cultivo Velalcázar (2018).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Las semillas de higuierilla son similares entre sí, por lo tanto, en las zonas óptimas con respecto al tamaño, en el punto R.C.JUN se obtuvo mayor dimensión en ancho y largo, y en grosor en el punto R.C.URCU. Mientras que para las zonas no óptimas, se demostró que en el punto R.C.COTA hubo una mayor medida en ancho y grosor, y para el caso de la variable largo las semillas del punto R.C.IBA.

En la obtención del rendimiento de aceite mediante fluidos supercríticos el mayor rendimiento de las zonas óptimas fue en R.C.URCU y en las zonas no óptimas se dio en los puntos R.C.IBA y R.C.CHAL. Para el caso de la extracción con solventes (Soxhlet) el mayor rendimiento de las óptimas se obtuvo en el punto R.C.URCU y de las no óptimas fue en R.C.COTA.

Los rendimientos obtenidos de biodiésel son directamente proporcional al rendimiento de aceite por lo tanto éstos fueron similares para todos los puntos de estudio, obteniendo mayor rendimiento en las zonas óptimas en R.C.JUN y en las zonas no óptimas en el punto R.C.COTA.

5.2 Recomendaciones

Realizar estudios posteriores sobre este proyecto sobre todo en las zonas no óptimas con la finalidad de utilizar biocombustibles de menor grado de contaminación con el ambiente, incentivando a los agricultores a la producción de Higuierilla.

Realizar el mismo estudio, pero tomando en cuenta las 13 000 mil hectáreas del escenario de clima para las zonas óptimas, del estudio que realizó Velalcázar (2018), con el fin de aumentar la producción de biodiésel y poder cubrir la demanda para el escenario B5 en la provincia de Imbabura.

Analizar el tipo de suelo, temperatura, pH, precipitación, entre otros parámetros, de las zonas donde se realizó la cosecha de la semilla ya que fueron obtenidas de plantas de higuerilla desarrolladas de forma silvestre.

Examinar el tipo de extractor de aceite que se va a utilizar, procurando que éste sea más eficiente con el fin de evitar pérdidas en la producción de aceite.

Si se va a utilizar muestras pequeñas de aceite, conseguir un reactor adecuado para la producción de biodiésel con las características apropiadas.

Para elevar el porcentaje de aceite, es fundamental pelar la cáscara que tiene la semilla y triturlarla para facilitar la extracción y elevar así el rendimiento en el proceso de extracción.

BIBLIOGRAFÍA

Ahas, R. J. (2000). The phenological calendar of Estonia and its correlation with mean air temperature. *Biometeorol*, p. 159-166.

Alkio, M., Gonzalez, C., Jäntti, M, y Aaltonen, O. (2000). Purification of polyunsaturated fatty acid esters from tuna oil with supercritical fluid chromatography. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 315-321.

Alonso, J. M. (2009). *Técnicas del Automóvil*. Mexico: Paraninfo.

Anjani, K. (2012). Castor genetic resources: A primary gene pool for exploitation. *Industrial Crops and Products*, 35, 1-14.

Aponte, R. S. (2011). Fenología y ensayos de germinación de diez especies forestales nativas, con potencial productivo maderable y no maderable del bosque protector de la parroquia San Pedro de Vilcabamba, Loja.

Arancibia y Calero. (2011). Obtención de biodiesel a partir del aceite de semillas oleaginosas de la provincia de Chimborazo.

Arango, M. E. (1990). La higuierilla como alternativa de sombrero de zonas bajas. Obtenido de Universidad del Quindío. *Tecnología Agropecuaria*. Armenia. Pag 71.: [https://www.ecured.cu/Higuerilla_\(Planta\)](https://www.ecured.cu/Higuerilla_(Planta))

Ardila, J. L. (2010). caracterización del biodiesel producido a partir de aceite de higuierilla y evaluación de las variables de proceso sobre el porcentaje de.

Ardilla et al. (2010). Caracterización del biodiesel producido a partir de aceite de higuerilla y evaluación de las variables de proceso sobre el porcentaje de glicerina. En Virtualpro (p. 1900-6241). no. 103.

Banco Mundial. (2017). Agricultura, valor agregado (% del PIB). Recuperado de <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.ZS?end=2016&locations=EC&start=2015&view=chart>

Beltrão, M.; Silva, L.; Vasconcelos, L.; y Azevedo, P. (2001). Agronegocio da mamona no Brasil. Embrapa Algodão, Campina Grande, 37-61. Obtenido de Fitología agronegocio da mamona no Brasil. Embrapa Algodão, Campina Grande.

BEN. (2016). Balance Energético Nacional.

BID. (2017). Banco Interamericano de Desarrollo. Obtenido de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático: <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6027/Ecuador%20-%20IDB-TN-619.pdf?sequence=1>

Bonilla, M. (2007). Biocombustibles. Biodiesel-Bioetanol. En Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá.

Bonilla, M. (2007). Biocombustibles. Biodiesel-Bioetanol. Obtenido de Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Brunner, G. (2013). Gas extraction: an introduction to fundamentals of supercritical fluids and the application to separation processes (Vol. 4). Springer Science & Business Media.

Cara García, J. A. (2006). La observación fenológica en agrometeorología. Ambiental, 64-69.

Castro, H., Benelli, P., Ferreira, S y Parada, A. (2011). Guava (*Psidium guajava* L.) seed oil obtained with a homemade supercritical fluid extraction system using supercritical CO₂ and co-solvent, *Journal of Supercritical Fluids*. 238-242.

CEPAL. (29 de Marzo de 2011). Brasil, Argentina y Colombia lideran producción de biocombustibles en la región. Obtenido de CEPAL: <http://www.cepal.org/es/comunicados/brasil-argentina-y-colombia-lideranproduccion-de-biocombustibles-en-la-region>.

Chierice, G. N. (2001). Aplicação industrial do óleo. En M. y. Pedrosa de Azevedo, O agronegócio da mamona no Brasil. (págs. p. 89-118). Campina Grande, BRASIL.

Conceição, M. M. (2007). Thermoanalytical characterization of castor oil biodiesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 965-975.

Constitución de la República del Ecuador. (20 de Octubre de 2008). Registro oficial, 449.

Córdova et al. (2008). Ecofisiología. En Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Higuierilla: “Alternativa Productiva, Energética y Agroindustrial para Colombia” (pp. 26-27). Obtenido de http://agropecuaria-primotc.hosted.exlibrisgroup.com/BAC:bac_completo:bac_digitoool43631

Cornejo, M. &. (Noviembre de 2012). Caracterización de aceite de higuierilla (*Ricinus communis*) de dos variedades silvestres para la producción de biodiesel en la región del Valle de Mezquital, Hidalgo.

Correa, M. d. (2014). “ANálisis comparativo de características físicas y fitoquímicas del aceite de ricino generado en semillas de ecotipos autóctonos de higuierilla (*Ricinus*

communis), en Tungurahua y Manabí”. Obtenido de Universidad de Ambato: Ambato-Ecuador

Costa, A. (2013). Biomasa y biocombustibles. Madrid-España: AMV Ediciones.v.

Creus, A. (2014). Energías Renovables. Bogotá: Ediciones de la U.

Dai, Edwards y Ku. (1992). Control of photosynthesis and stomatal conductance in *Ricinus Communis* L. (Castor Bean) by leaf to air vapor pressure deficit. *Plant Physiol*, 99, 1426-1434.

Damien, A. (2010). La biomasa: Fundamentos, tecnología y aplicaciones. Madrid, España: AMV Ediciones.

De Cara, J. (2006). La observación fenológica en agrometeorología. En Ministerio de Medio Ambiente (págs. 64-70). Madrid: Revista Ambiental 53.

Di Paola, M. M. (20 de Marzo de 2014). FARN. Obtenido de FARN: <http://www.farn.org.ar/wp-content/uploads/2014/07/La-producci%C3%B3n-de-biocombustibles-en-Argentina-por-Mar%C3%ADa-Marta-Di-Paola.pdf>

Díaz, G. G. (2012). Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. INIFAP-Centro Experimental Cotaxtla. Obtenido de http://www.cmdrs.gob.mx/sesiones/Documents/2012/5_sesion/inifap_estudio.pdf

El Diario. (08 de Diciembre de 2015). Producción: Promueven la higuera. Obtenido de <http://www.eldiario.ec/noticias-manabi-ecuador/375526-promueven-la-higuera/>

Espin, P. (2016). Estudio de factibilidad para la implementación de biodiésel en las estaciones de servicio de la ciudad de Ibarra. Ibarra.

Espinoza, X., Valencia, G., Gracia, A., Grijalva, O., Hernández, A., Coyac, R., y MC, J. (2019). Productividad de Higuierilla (*Recinus communis* L.). Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 10.

ESPOL. (Septiembre de 2009). Comparación del Porcentaje de Aceite y del Tamaño de Seis ecotipos de Semillas de Higuierilla (*Ricinus Communis*), de Origen Sudamericano. Obtenido de Escuela Superior Politecnica del Litoral. Guayaquil-Ecuador: <http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/viewFile/66/37>

Falasca et al. (2012). Developing an agro-climatic zoning model to determine potential production areas for castor bean (*Ricinus communis* L.). Obtenido de Industrial Crops and Products, 40, 185-191.

FAO. (2008). Biocombustibles: Perspectivas, Riesgos y Oportunidades. Obtenido de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0100s/i0100s05.pdf>

FAO. (2012). Zonificación Agro-Ecológica General. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación.

Fernandez, J. M. (2010). Guía completa de la biomasa y los biocombustibles. Madrid: AMV Ediciones.

Freire, R. (2001). Agronegocio da mamona no Brasil. Embrapa Algodão. En Ricinoquímica (págs. pp. 295-335). Campina Grande.

Gobierno Autonomo Descentralizado de Imbabura. (15 de AGOSTO de 2015). Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de Imbabura 2015-2035. Obtenido de http://app.sni.gob.ec/snmlink/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/1060000180001_PDOT%20IMBABURA%202015-2035_SIGAD_15-08-2015_22-50-42.pdf

Guerrero, C. Osorio, I. Sierra, F. (2010). Evaluación del efecto de la temperatura en la producción de biodiesel de higuera. En Ingeniería e investigaciones (págs. p 52-61.). Vol. 30. No.2.

Hernandez, M. (19 de 12 de 2006). Cultivos Energéticos. Obtenido de <http://lan.inea.org:8010/web/materiales/cultivosEnergeticos.pdf>.

Hincapié et al. (22 de Julio de 2011). Transesterificación de aceite de higuera crudo utilizando catalizadores heterogéneos - estudio preliminar. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín).

Hopp, R. J. (1974). Plan Phenology Observation Networks. Phenology and Seasonality Modeling, 1-2.

Hurtado, B. (2002). Estudio del proceso de extracción de componentes minoritarios de aceite de oliva con CO₂ supercrítico en contracorriente. Obtenido de Universidad Autónoma de Madrid. Ingeniería Química: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v18n1/art09.pdf>

IICA. (2007). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Obtenido de Preguntas y respuestas más frecuentes sobre biocombustibles.: <http://www.administracion.usmp.edu.pe/institutoconsumo/wp-content/uploads/2013/08/Biocombustibles-IICA.pdf>

IICA. (2010). Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas. <http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/IICA/Atlas%20de%20Bioenergia%20y%20Combustibles%202.pdf>

IICA. (2010). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Obtenido de Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: <http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/IICA/Atlas%20de%20Bioenergia%20y%20Combustibles%202.pdf>

IICA y Samayoa. (2007). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Obtenido de Preguntas y respuestas más frecuentes sobre biocombustibles.: <http://www.administracion.usmp.edu.pe/institutoconsumo/wp-content/uploads/2013/08/Biocombustibles-IICA.pdf>

INAMHI. (2019). Boletín Climatológico 2019. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

Instituto Tecnológico de Atitalaquia. (2014). Extracción de aceite de higuierilla mediante un proceso verde para la obtención de biodiesel. http://congresos.cio.mx/14_enc_mujer/cd_congreso/archivos/resumenes/S4/S4BYQ21.pdf

INEC. (2010). Instituto Nacional de Estadística y Censos. Resultados del Censo 2010 de población y vivienda en el Ecuador: Fascículo provincial Imbabura. Obtenido de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manu-lateral/Resultados-provinciales/imbabura.pdf>

INIAP. (2014). Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Obtenido de <http://tecnologia.iniap.gob.ec/index.php/homepage>

ISTA. (2005). International Rules for seed testing. Rules and annexes. En International Seed Testing Association (págs. 3-177).

Jeong y Park. (Mayo de 2009). Obtenido de Optimization of Biodiesel Production from Castor Oil Using Response Surface Methodology. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 156 (1-3), 1-11.

Jeong y Park. (Mayo de 2009). Obtenido de Optimization of Biodiesel Production from Castor Oil Using Response Surface Methodology. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 156 (1-3), 1-11.

Jijon, W., y Torres, K. (2008). Fenología de cinco especies forestales en el bosque natural del cantón Mocache y parcelas establecidas en la represa Daule-Peripa. Quevedo: Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

Kiran, E., Debenedetti, P. G., y Peters, C. J. (Eds.). (2012). *Supercritical fluids: fundamentals and applications* (Vol. 336). Springer Science & Business Media.

Lamarque, A. Z. (2008). *Fundamentos teóricos-prácticos de química orgánica*. Pag 1-51.

Leal, D., y Jiménez, D. (2009). Caracterización Morfométrica de cinco ecotipos de Higuierilla (*Recinus communis*) en la ESPOL "Campus Gustavo Galindo". Obtenido de Escuela Superior Politécnica del Litoral: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/5245/1/Caracterizaci%C3%B3n%20Morfom%C3%A9rica%20de%20cinco%20ecotipos%20de%20higuerilla%20en%20la%20ESPOL.pdf>

Legaz, B. . (06 de 2010). Estudio de la viscosidad y densidad de diferentes aceites para su uso como biocombustible. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/9403>

Leython, S. &. (2008). Morfología de la semilla y anatomía de la cubierta seminal de cinco especies de Calliandra (Leguminosae-Mimosoideae) de Venezuela.

Lieth, H. (1997). Objetivos y métodos en el monitoreo fenológico, en Fenología. En H. Lieth, Climas estacionales. (págs. 1-21).Lima, Antonino, Souza, Lira, y Silva. (2013). Seasonal and interannual variations of evapotranspiration, energy exchange, yield and water use efficiency of castor grown under rainfed conditions in northeastern Brazil. *Industrial Crops and Products*, 50, 203-211.

Little W. (2012). A Sonoran Desert Scrapbook. Obtenido de Some Desert Plants of Kino Bay and Vicinity: <https://books.google.com.mx/books?id=zCpruKm8aWoC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

MAG. (1991). Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica. Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola. San José, Costa Rica: Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Mangold, H. (1983). Liquified gases and supercritical fluids in oilseed extraction, *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 60, 178A-179A. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v18n1/art09.pdf>

Manzano, P. R. (2009). Comparación del Porcentaje de Aceite y del Tamaño de Seis Ecotipos de Semillas de Higuierilla (*Recinus communis*), de Origen Sudamericano. *Revista Tecnológica ESPOL*.

Martinez, J., & Montenegro, O. (2008). Manejo de suelos. En Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Higuierilla: “Alternativa Productiva, Energética y Agroindustrial para Colombia” (pp. 8-10). Obtenido de http://agropecuaria-primotc.hosted.exlibrisgroup.com/BAC:bac_completo:bac_digitoool43631

Matos, E. H. (2007). Cultivo da Mamona e Extração do Óleo. Obtenido de <http://respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/MjE3>

Mazzani et al. (2013). Ensayos regionales de evaluación de variedades de tártago ((*Ricinus communis* L.) en cinco ambientes de siembra en Venezuela. UDO Agrícola, 13 (1), 32-38.

MEF. (2018). Ministerio de Economía y Finanzas. Proforma del Presupuesto General del Estado 2019. Quito, Ecuador. Obtenido de Ministerio de Economía y Finanzas: Quito-Ecuador

Mendoza & Reyes. (2015). Guía del cultivo de higuera. Departamento de Comunicación Social y Relaciones Públicas del INIAP. Obtenido de <http://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/1186/1/GUIA%20DEL%20CULTIVO%20DE%20HIGUERILLA.pdf>

Mendoza & Reyes. (2015). INIAP-401: Nueva variedad de higuera indehisciente, de altos rendimientos. Obtenido de Departamento de Comunicación del INIAP: <http://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/1120/1/INIAP-401.pdf>

Mendoza y Reyes. (2015). Guía del cultivo de higuera. Departamento de Comunicación Social y Relaciones Públicas del INIAP. Obtenido de <http://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/1186/1/GUIA%20DEL%20CULTIVO%20DE%20HIGUERILLA.pdf>

Mendoza y Reyes. (2015). Guía del cultivo de higuera. Departamento de Comunicación Social y Relaciones Públicas del INIAP. Obtenido de <http://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/1186/1/GUIA%20DEL%20CULTIVO%20DE%20HIGUERILLA.pdf>

Mondragón, R. (2009). Transesterificación del aceite de higuera. Hermosillo, Sonora: Universidad de Sonora.

Moshkin, V. A. (1986). Botanical and biological properties of castor. New Delhi, 11-64.

Banco Mundial. (2014). Consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total). Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS?locations=EC&view=chart>

Navarrete, L. (2009). Extracción y Caracterización Físicoquímica de Aceite de Higuierilla. Obtenido de Investigación en Ingeniería.

NTE INEN 1489, I. E. (Enero de 2012). Obtenido de lawresource.org: https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cadrja&uact=8&ved=0ahUKEwjh592r_v_KAhUEHx4KHcG1CnYQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.arch.gob.ec%2Findex.php%2Fnormas%2Fdoc_download%2F291-norma-inen-1489-2012.html&usg=AFQjCNFjD_tGWRVML1ro2gs

Olmedo, M., Chornet, S., Bertomeu, I., y Perea, S. (2015). Química Orgánica. España: LIMUSA S.A De CV.

OPEP. (2018). Evolución anual del precio medio del petróleo crudo fijado por la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) de 1960 a 2018 (en dólares por barril). Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/635114/precio-medio-del-crudo-fijado-por-la-opep/>

Pantoja, A. (2016). Extracción de aceites con fluidos supercríticos a partir de semillas de frutas con potencialidad en la industria cosmética. En Universidad Nacional de Colombia (págs. 44-63). Palmira. Colombia: http://bdigital.unal.edu.co/54767/1/Tesis-Ana_Lucia_Pantoja_Chamorro-2016.pdf. Obtenido de http://bdigital.unal.edu.co/54767/1/Tesis-Ana_Lucia_Pantoja_Chamorro-2016.pdf

Pantoja, A. (2016). Extracción de aceites con fluidos supercríticos a partir de semillas de frutas con potencialidad en la industria cosmética. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: http://bdigital.unal.edu.co/54767/1/Tesis-Ana_Lucia_Pantoja_Chamorro-2016.pdf

Perez, C. V. (2013). Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. PHENOLOGY OAK (*Quercus humboldtii* Bonpland). Cauca, Colombia.

Petroecuador. (2016). Informe Estadístico año 2016. Obtenido de <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/06/INFORME-ESTADISTICO-2016.pdf>

Prodan, M. (1997). Mensura Forestal. IICA-BMZ/GTZ. San José - Costa Rica: AgEng CIGR.

Quijada, M. V. (2017). Normas Principales para las Pruebas Rutinarias de Semillas Forestales. (Basada en Normas Internacionales ISTA). Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes. Merida, 1-6.

Ramirez, M. (08 de Junio de 2008). Nota técnica LA HIGUERILLA. (*Ricinus communis*). Obtenido de www.cohep.com/Centro_doc/cies%20-%20La%20Higuerilla.doc

Rendón, N., y Triviño, J. (2009). Producción y Exportación de la Higuerila (*Ricinus comumunis* L.) Colombia como Materia Primas para la Elaboración de Biocombustibles. Escuela superior Politécnica del Litora. Facultad de Economía y Negocios. Guayaquil, Ecuador. Obtenido de Escuela superior Politécnica del Litora. Facultad de Economía y Negocios.

Rivera, P., y Hernández, J. (2016). Evaluación del rendimiento y calidad del aceite de evaluación del rendimiento y calidad del aceite de *Ricinus communis*. comunicación corta, p. 184-188.

Rizzardo, P., Milfont, M., Da Silva, E y Freitas, B. (2012). Apis mellifera Pollination Improves Agronomic Productivity of Anemophilous Castor Bean (*Ricinus communis*). Anais de Academia Brasileira de Ciencias, 1-9.

Rodriguez, P. (2016). La floración, Infobiología.

Rogelio, O. L. (2008). Curso práctico de química orgánica enfocado a biología y alimentos.

SAGPyA. (21 de Enero de 2010). Biodiésel en Argentina (en línea). . Obtenido de <http://www.sagpya.gov.ar/new/0-0/agricultura/otros/biodiésel/final24-01.PDF>

Salas, C. (2005). Medición de diámetros fstaes con relascopio y forcipula finladesa: Efectos en la estimación de volumen.,. Bosque (Valdivia), 26 (2), 81-90.

Samayoa, M. O. (2007). Manual técnico del higuerrillo. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/52428162/Manual-Tecnico-del-Higuerrillo>

Sánchez, A., y Larrote, F. (19 de Julio de 2011). Floración de especies arbóreas urbanas y concentración de polen en el aire. Ríos, Argentina.

Santander, J. R. (2010). Técnico en Mecánica y Electrónica Automotriz. Bogotá, Colombia.

Sardón, J. M. (2003). Energías Renovables para el Desarrollo. Madrid-España: Editorial Paraninfo.

Severino, L. A. (2012). A review on the challenges for increased production of castor. *Argonomy Journal* , 853-880.

Valderrama, J. (1994). *Biotecnología*, Vol 5, 1-89 pp.

Vargas, J., y Navarro. (2014). Determinación de un tamaño adecuado de unidad experimental, utilizando el método de curvatura máxima, para ensayos de arroz (*Oryza sativa*). *Revista de las Sedes Regionales*, 128-144.

Velalcázar, M. (2018). Análisis de variables climáticas y edafológicas de la higuierilla como potencial cultivo energético para producción de biodiesel en Imbabura.

Velasco, J., Villada, H., Carrera, J. (2007). Aplicaciones de los Fluídos Supercríticos en la Agroindustri. Obtenido de Universidad del Cauca. Departamento de Agroindustrias. Facultad de Ciencias Agropecuarias.: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v18n1/art09.pdf>

Velasquez, S. (2012). Estimation and comparison of pruned biomass dependin on lacion an pruning practics applier in urband morusalba trees. Obtenido de Valencia España : Ag Eng - CIGR.

Vicente, A. M. (2012). Orígenes y clasificación de la biomasa. Madrid-España: AMV Ediciones.

Villegas, J. (2019). “Extracción de aceite de higuierilla (*ricinus communis*) con cuatro alcoholes disolventes a nivel de laboratorio, Jaén-Cajamarca”. *Universidad Nacional de Jaén*, 37-38.

Viloria, J. (2012). Energías Renovables. En *Lo que hay que saber*. España: Paraninfo.

Weiss, E. (1983). *Oilseed crops.*, (pág. 660). London: Longman.

Zimble, A. &. (2003). Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne lidar. *Obtenido de Remote Sensing of environment* 87: 171-182.

ANEXOS

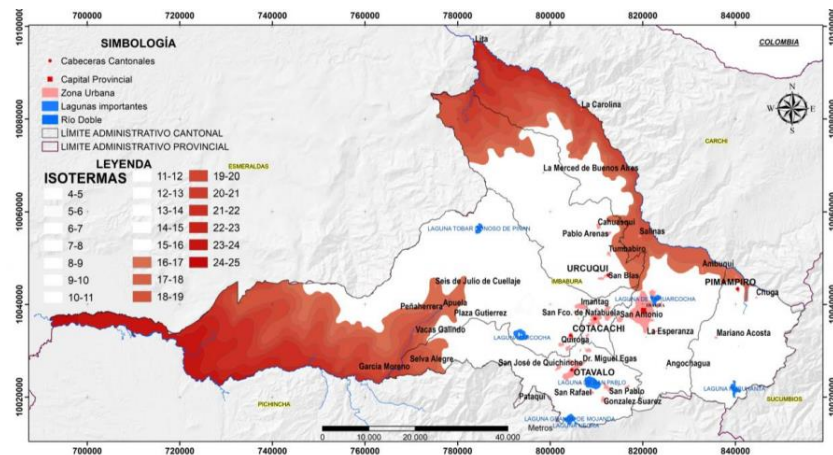
Anexo 1

Topografía del terreno



Anexo 2

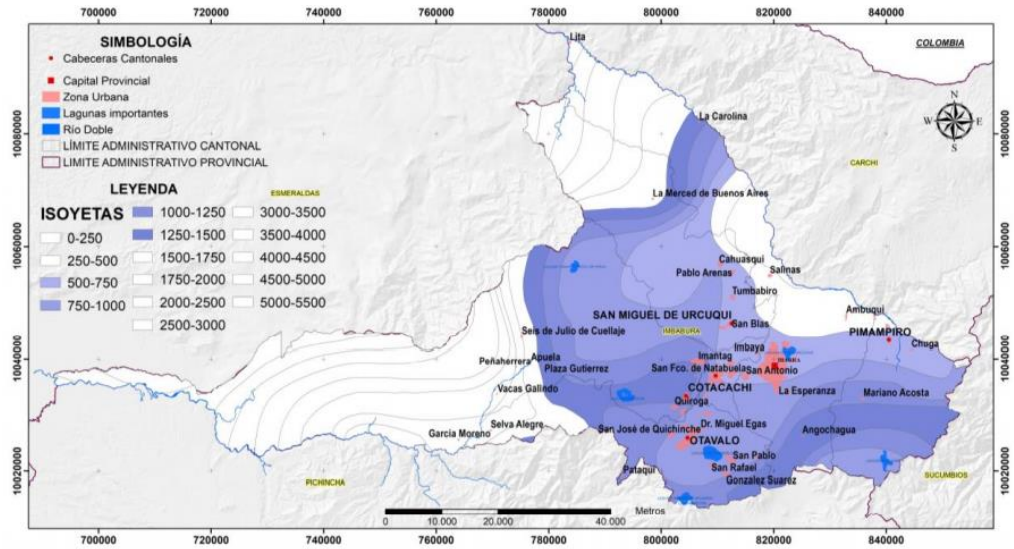
Mapa de isotermas de la provincia de Imbabura



Fuente: (INAMHI, 2017)

Anexo 3

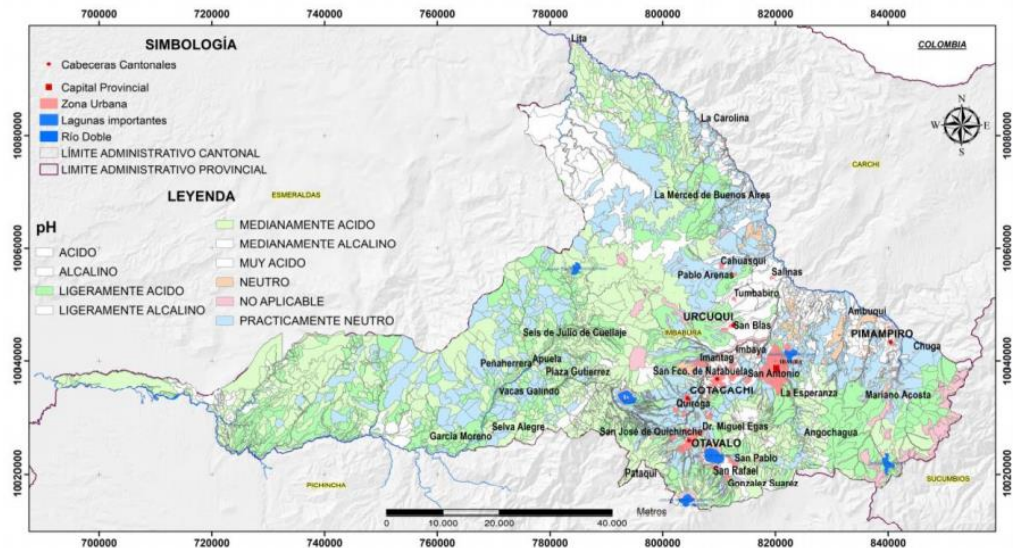
Mapa de isoyetas en la provincia de Imbabura



Fuente: (INAMHI, 2017)

Anexo 4

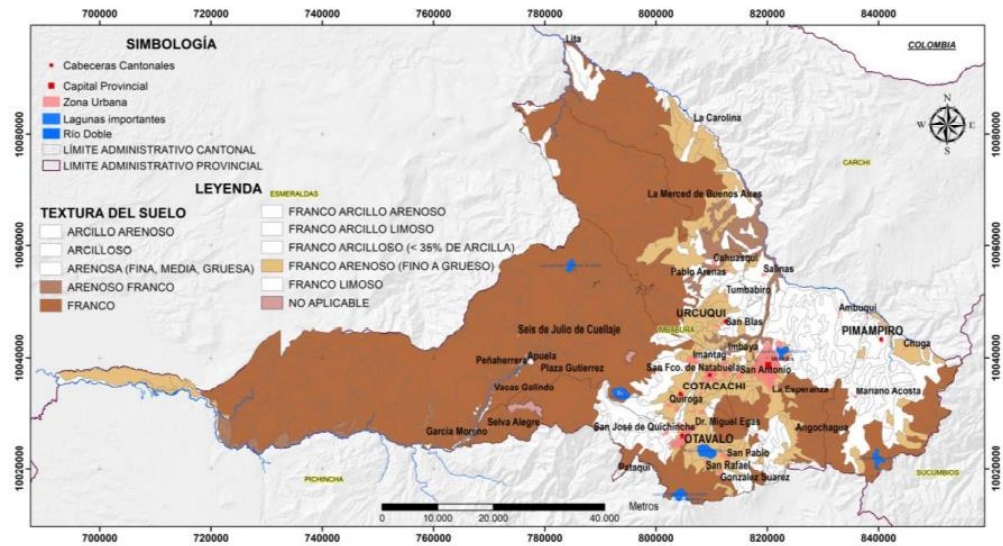
Mapa de pH de suelos de la provincia de Imbabura



Fuente: (IEE, 2015)

Anexo 5

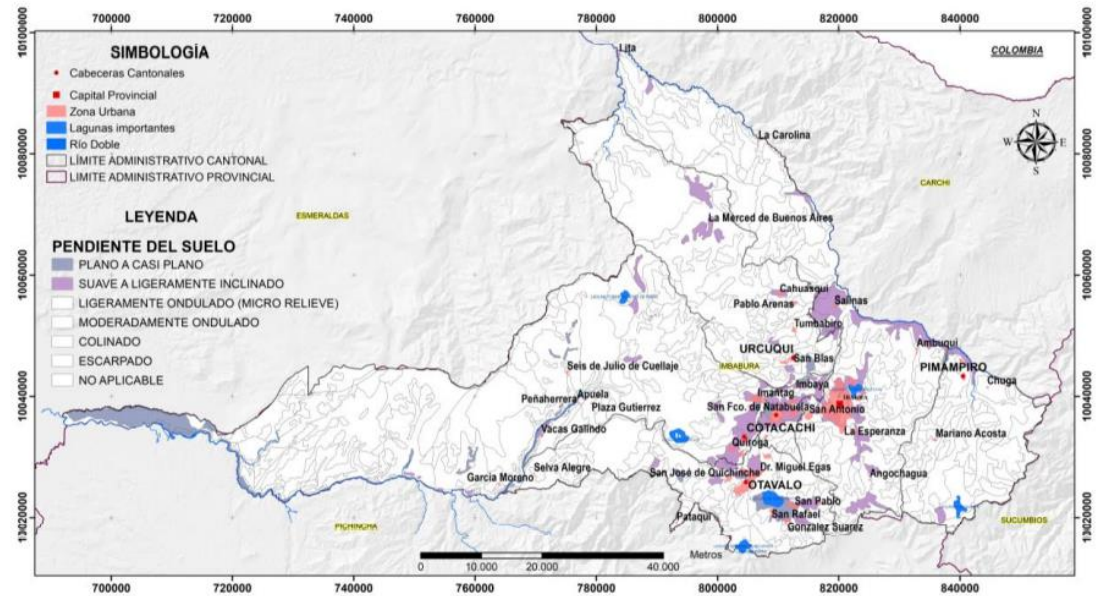
Mapa de textura de suelos en la provincia de Imbabura



Fuente: (IEE, 2014)

Anexo 6

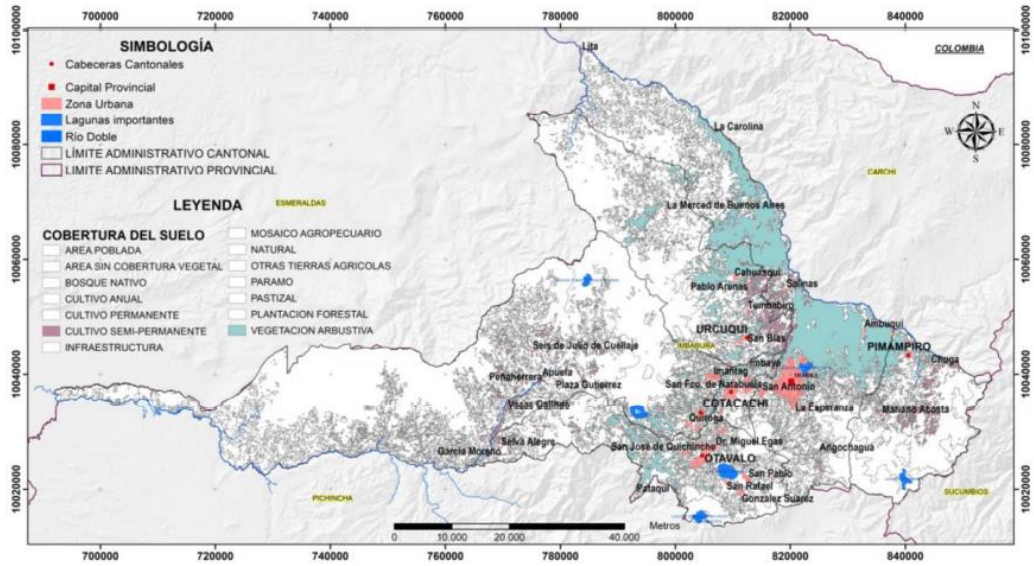
Mapa de pendientes de la provincia de Imbabura



Fuente: (IEE, 2014)

Anexo 7

Mapa de cobertura y uso del suelo en la provincia de Imbabura



Fuente: (MAGAP - MAE, 2015)

Anexo 8

Ubicación del punto 5 zonas óptimas



Anexo 9

Ubicación del punto 7 zonas óptimas



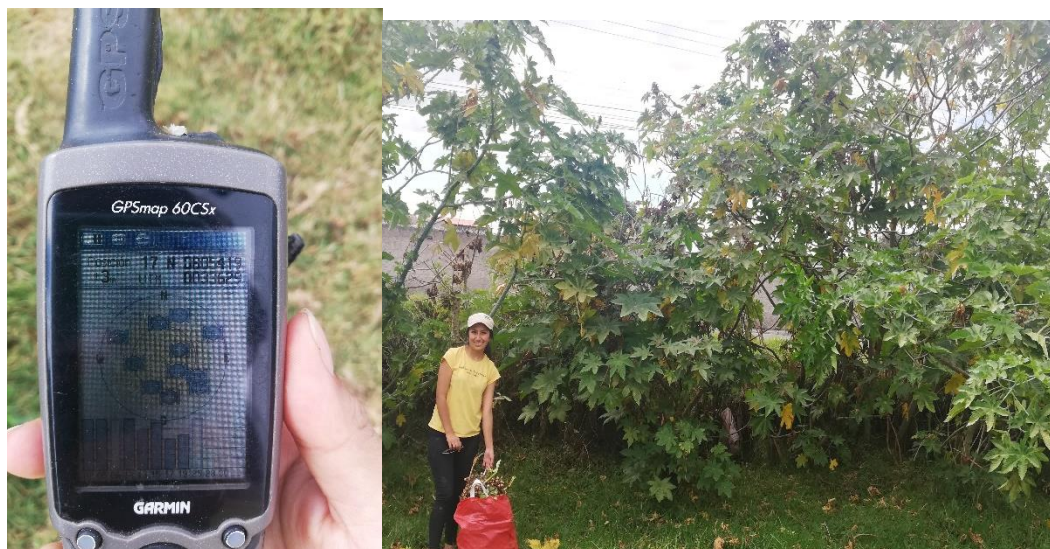
Anexo 10

Ubicación del punto 15 zonas óptimas



Anexo 11

Ubicación del punto 1 zonas no óptimas



Anexo 12

Ubicación del punto 2 zonas no óptimas



Anexo 13

Ubicación del punto 3 zonas no óptimas



Anexo 14

Secado por estufa



Anexo 15

Variación de semillas



Anexo 16

Pesaje de las semillas



Anexo 17

Resultados de extracción de aceite por FSC



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ÁREA DE INVESTIGACIÓN



REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO

Lugar y fecha: Quito, 23 de Diciembre de 2019

1. Datos del solicitante:

| |
|---|
| Nombre: Universidad Técnica del Norte |
| Dirección: Av. 17 de Julio, Ibarra, Ecuador |
| Cédula / Pasaporte / RUC: 1060001070001 |
| Teléfono: 062997800 |
| Persona de contacto: Dr. Juan Carlos García Teléfono: 0997580055 |

2. Especificaciones del ensayo

| |
|--|
| Muestra: Biomasa |
| Descripción: Convenio UTN – UCE |
| Tipo de ensayo: Extracción Fluido Supercrítico |
| Equipo / máquina: Spe-ed SFE System |
| Analista: Yadiria Vilca / Ing. Pablo Londoño |

3. Resultados

| Muestra | Masa ingresada (g) | Masa Extracto (g) | Rendimiento (%) |
|-----------|--------------------|-------------------|-----------------|
| R.C. IBA | 50.0789 | 1.2569 | 2.5098 |
| R.C. CHAL | 50.0079 | 1.2554 | 2.5104 |
| R.C. COTA | 50.4750 | 0.7934 | 1.5719 |
| R.C. URCU | 50.1238 | 0.7840 | 1.5641 |
| R.C. JUN | 50.0775 | 0.6259 | 1.2499 |
| R.C. PIM | 50.0726 | 0.7049 | 1.4079 |

Todas las muestras fueron tratadas bajo las mismas condiciones:

| | |
|-----------------------------------|-----|
| PRESION (BAR) | 400 |
| TEMPERATURA (°C) | 80 |
| TIEMPO ESTÁTICO (min) | 25 |
| TIEMPO DINÁMICO (min) | 60 |
| CAUDAL CO ₂ (mL /min) | 10 |

Ing. Pablo Londoño, M.Sc.
Responsable del Área de Investigación