

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**EVALUACIÓN DE HUELLA ECOLÓGICA DE LA
PRODUCCIÓN DE BIOETANOL Y BIODIESEL EN EL
SALVADOR**

PRESENTADO POR:

JACQUELINE MICHELL FERNANDEZ ARENIVAR

MARTA MARIA MAGAÑA NÚÑEZ

KARLA MARIA PINEDA ALFARO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2015

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA DE ALIMENTOS

DIRECTOR :

ING. TANIA TORRES RIVERA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERA QUIMICA

Título :

**EVALUACION DE HUELLA ECOLOGICA DE LA
PRODUCCION DE BIOETANOL Y BIODIESEL EN EL
SALVADOR**

Presentado por :

JACQUELINE MICHELL FERNANDEZ ARENIVAR

MARTA MARIA MAGAÑA NUÑEZ

KARLA MARIA PINEDA ALFARO

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

M. en I. ALBA MARISELA SARAVIA CORTEZ

San Salvador, febrero 2015

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

M. en I. ALBA MARISELA SARA VIA CORTEZ

AGRADECIMIENTOS

Primero y antes que nada, dar gracias a Dios, por estar con nosotros en cada paso que damos, por fortalecer nuestro corazón e iluminar nuestra mente y por haber puesto en nuestro camino a aquellas personas que han sido nuestro soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Les agradecemos sinceramente a nuestras familias por su confianza y todo el apoyo, consejos y ayuda, sin ellos no habríamos podido llegar a este punto pues hemos necesitado su cariño, comprensión y su apoyo incondicional.

Este trabajo no se habría podido realizar sin la colaboración de muchas personas e instituciones que nos han brindado su ayuda, sus conocimientos y su apoyo. Por ello es para nosotros un verdadero placer utilizar este espacio para expresarles nuestros más sinceros agradecimientos.

Quedamos especialmente agradecidos con nuestra directora de tesis, la Ingra. Alba Marisela Saravia Cortez quien nos ha ayudado y apoyado en todo momento. Ha corregido minuciosamente este trabajo y nos ha dado la posibilidad de mejorarlo.

Desde luego agradecemos a todos nuestros amigos y compañeros que han hecho las largas jornadas de estudio que acompañan esta carrera mucho más amenas y fáciles de llevar.

Por Jacqueline Michell Fernández Arenivar

Principalmente, a ti **Jehová** por ser la luz y la fortaleza de mi vida, por acompañarme y guiarme en el camino; es a ti a quien yo debo y dedico este triunfo en mi vida, porque por tu gracia y misericordia mi corazón se alentó a esperar tus bendiciones a lo largo de mi carrera universitaria que se materializan en la presente investigación. *Alabado seas por siempre.*

A ti **Mirian Arenivar**, por ser mi madre y el ejemplo de lucha y de sacrificio, por acompañarme en cada tristeza y en cada alegría, por quitar las lágrimas de mis ojos en esas noches de desesperación, por acompañarme en cada desvelo y sobre todo por animarme a nunca darme por vencida.

A mi hermana, **Mercy Fernández**, por ser un apoyo incondicional durante todos estos años, por animarme a seguir luchando día tras día, por celebrar mis triunfos y por apoyarme en mis fracasos. A mi tío, **Nelson Arenivar**, por apoyarme siempre, por brindarme las herramientas necesarias para emprender y culminar esta carrera universitaria.

A todos mis familiares: padre, abuelos, tíos, primos y cuñado; en especial a ti, mi niña bella, **Marina Fernández**, que tu sonrisa y abrazos tan amorosos eran la mejor inyección de esperanza: Verte en pie, viva y feliz es la mejor muestra de lucha de vida y es mi mayor ejemplo de perseverancia y de amor incondicional.

A mis amigos y conocidos, por el apoyo arduo y constante en este proceso, por nunca dejarme sola ni en los momentos de alegría ni en los de tristeza. Y en general, pero no menos importante, a todas aquellas personas que me han brindaron su apoyo incondicional desde siempre.

Jacqueline Fernández.

Por Marta María Magaña Núñez.

A **Dios** todo poderoso por haberme permitido la vida, por ser mi fortaleza en los momentos malos, darme todas sus bendiciones y escucharme siempre que quiero hablar con Él, por ser siempre ese amigo fiel que nunca me falla y darme la oportunidad de llegar a la culminación de otra etapa más, sé que otras vendrán, pero siempre de la mano de Él. A **María Auxiliadora** modelo de mujer, de madre y de amiga que siempre intercede por mí y me cuida como la madre amorosa que es.

A mis padres **Alfonso y Marta**, que con su apoyo incondicional siempre estuvieron y están en todos los momentos de mi vida, dándome sus consejos y su amor, y deseando todo lo mejor para mi vida, que siempre, a pesar de lo grande que fueran los obstáculos, creen en mí y me motivan para superar cada uno de ellos.

A mis hermanos **Moi y Dani** que siempre me animaron con cada una de sus palabras y me escuchan y me dan su amor incondicional. A **Johan**, por apoyarme en cada uno de los momentos de la universidad y de mi vida, y darme su cariño incondicional, por haber llenado mis días de felicidad, ser ese compañero y ese amigo que está siempre para mí.

A todos los **docentes** de la Escuela de Ingeniería Química que, con cada una de las enseñanzas y con cada momento de sus clases, forjaron la profesional que ahora soy.

A mis amigos que siempre me apoyaron y que con cada una sus ocurrencias hacen de mi vida un lugar lleno de felicidad y de cariño.

Marta Magaña.

Por Karla María Pineda Alfaro

Yavé ira delante de ti. El estará contigo; no te dejará ni te abandonará. No temas, pues, ni te desanimas. (Deut. 31:8)

Sin lugar a dudas este logro y todos lo de mi vida se los debo a **Dios Todopoderoso** por ser siempre la luz en mi camino, mi guía y sobre todo, por darme lo necesario para poder alcanzarlos, por enseñarme que todo esfuerzo al final tiene su recompensa. Gracias Dios por todo.

A mis **amados Padres**, por cada uno de estos años que me han dado lo mejor de sí mismos, por guiarme en el camino del Señor, por enseñarme que todo en esta vida se puede lograr siempre y cuando se confíe ciegamente en Dios, por brindarme su apoyo, no puedo decir más que mil gracias papás por ser los mejores de mi vida. A mi **abuelita**, por cada uno de sus regaños que han hecho que mi vida siempre sea mejor y sobre todo por llevarme en tus oraciones diarias.

A mi **hermana**, por acompañarme siempre, por estar ahí cuando más lo necesitaba, por impulsarme día a día a superarme y ser mejor persona. A **Camila bebé**, por haber llegado a mi vida en el momento justo cuando necesitaba una inspiración por quien luchar, gracias por haberte convertido en el motor más importante para cumplir mi sueño.

A mi **novio Roberto**, por haberme aguantado todos estos años cuando estaba de mal genio y por explicarme las cosas que no entendía, pero sobre todo gracias por enseñarme a no ver el vaso vacío sino medio lleno.

A todas las demás personas que de una u otra forma estuvieron brindándome sus consejos y apoyándome siempre, sólo resta decirles gracias a cada uno de ustedes.

Karla Pineda.

CONTENIDO

RESUMEN	16
CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	17
1.1 INTRODUCCIÓN	17
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	19
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.5 JUSTIFICACIÓN	20
1.4 ALCANCES	21
1.5 LIMITACIONES	22
CAPÍTULO 2 BIOCOMBUSTIBLES.....	23
2.1 BIOCOMBUSTIBLES DE PRIMERA, SEGUNDA, TERCERA Y CUARTA GENERACIÓN 25	
2.2 BIOETANOL.....	29
2.2.1 <i>Generalidades como combustible</i>	30
2.2.2 <i>Materia prima</i>	34
2.2.3 <i>Procesos productivos</i>	34
2.2.4 <i>Producción en El Salvador</i>	36
2.2.5 <i>Panorama de producción y uso en El Salvador</i>	38
2.3 BIODIESEL.....	41
2.3.1 <i>Generalidades como combustible</i>	42
2.3.2 <i>Materia Prima</i>	47
2.3.3 <i>Procesos productivos</i>	50
2.3.4 <i>Producción en El Salvador</i>	55
2.3.5 <i>Panorama de producción y uso en El Salvador</i>	57
2.4 MARCO LEGAL Y REGULATORIO DEL SECTOR ENERGÉTICO EN EL SALVADOR ..	58
2.4.1 <i>Subsector hidrocarburos y combustibles</i>	62
2.4.2 <i>Biocombustibles</i>	63
2.5 POLÍTICA ENERGÉTICA DE EL SALVADOR	63
2.5.1 <i>Objetivos de la política energética</i>	64
2.5.2 <i>Beneficios ambientales potenciales que involucra la política energética</i>	64
2.5.3 <i>Estrategia de biocombustibles</i>	65
2.5.4 <i>Plan de acción para el desarrollo de la estrategia de biocombustibles</i>	66
CAPÍTULO 3 MEDICIÓN DE SOSTENIBILIDAD	67
3.1 CONCEPTO DE SOSTENIBILIDAD Y SU EVOLUCIÓN	68
3.2 DIFERENTES ENFOQUES DE SOSTENIBILIDAD	70
3.2.1 <i>Sostenibilidad social</i>	72
3.2.2 <i>Sostenibilidad ambiental</i>	72
3.2.3 <i>Sostenibilidad económica</i>	74
3.3 SOSTENIBILIDAD DEBIL Y SOSTENIBILIDAD FUERTE	75
3.4 HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD.....	76
3.4.1 <i>Indicadores sociales</i>	78
3.4.2 <i>Indicadores ambientales</i>	80
3.4.3 <i>Indicadores económicos</i>	82
3.5 HUELLA ECOLÓGICA.....	84
3.5.1 <i>Definición de huellas ambientales</i>	84
3.5.2 <i>Generalidades de Huella ecológica</i>	85

3.5.3	<i>Fundamentos de la huella ecológica</i>	87
3.5.4	<i>Metodología de cálculo de huella ecológica</i>	88
CAPÍTULO 4 EVALUACIÓN DE HUELLA ECOLÓGICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN EL SALVADOR		93
4.1	DESCRIPCIÓN DE CASO DE ESTUDIO	93
4.1.1	<i>Descripción de los procesos de producción</i>	93
4.2	BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN EL SALVADOR	108
4.2.1	<i>Biodiesel</i>	109
4.2.2	<i>Bioetanol</i>	112
4.3	INVENTARIO DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS	113
4.3.1	<i>Biodiesel</i>	114
4.3.2	<i>Bioetanol</i>	117
4.4	METODOLOGÍA DE HUELLA ECOLÓGICA	119
4.4.1	<i>Recursos materiales</i>	119
4.4.2	<i>Energía</i>	120
4.5	DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO	125
4.5.1	<i>Hoja de cálculo para materiales</i>	125
4.5.2	<i>Hoja de cálculo para energía</i>	133
4.5.3	<i>Hoja de cálculo para residuos</i>	139
CAPÍTULO 5 RESULTADOS		145
5.1	HUELLA ECOLÓGICA DE LA PRODUCCIÓN DE BODIESEL EN EL SALVADOR	145
5.2	HUELLA ECOLÓGICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL EN EL SALVADOR	146
5.3	HUELLA ECOLÓGICA SEGÚN EL TIPO DE FLUJO: MATERIALES, ENERGÍA Y RESIDUOS	147
5.3.1	<i>Huella ecológica de materiales</i>	147
5.3.2	<i>Huella ecológica de energía</i>	151
5.3.3	<i>Huella ecológica de residuos</i>	153
5.4	HUELLA ECOLÓGICA SEGÚN EL TIPO DE TERRENO	157
5.5	HUELLA ECOLÓGICA ESPECÍFICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES LIQUIDOS	160
5.5.1	<i>Biodiesel</i>	161
5.5.2	<i>Bioetanol</i>	161
5.6	COMPARACIÓN DE PROCESOS PRODUCTIVOS	162
5.6.1	<i>Biodiesel</i>	162
5.6.2	<i>Biodiesel-Bioetanol</i>	163
5.7	ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN ALTERNATIVOS	163
5.7.1	<i>Escenario 1: Utilización de mezcla B10 Y E10</i>	164
5.7.2	<i>Escenario 2: Utilización de mezcla B20 Y E20</i>	166
5.7.3	<i>Escenario 3: Producción de biodiesel combinando aceites para mezcla B10..</i>	167
5.7.4	<i>Escenario 4: Producción de bioetanol a través de todos los ingenios azucareros</i>	169
5.7.5	<i>Escenario 5: Producción de biocombustibles líquidos empleando toda el área de cultivo no cultivada en El Salvador</i>	169
5.7.6	<i>Escenario 6: Producción de biodiesel con reutilización de cascarilla de maní</i>	170
5.7.7	<i>Escenario 7: Valorización energética de cascarilla de higuero y tempate</i>	171
CAPÍTULO 6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS		172
6.1	ESCENARIO BASE DE LA PRODUCCIÓN DE BODIESEL Y BIOETANOL EN EL SALVADOR	172
6.1.1	<i>Huella ecológica según el tipo de flujo: materiales, energía y residuos</i>	176

6.1.2	<i>Huella ecológica según tipo de terreno</i>	177
6.2	ANÁLISIS DE ESCENARIOS ALTERNATIVOS	178
6.2.1	<i>Escenario 1: Utilización de mezcla B10 Y E10</i>	178
6.2.2	<i>Escenario 2: Utilización de mezcla B20 Y E20</i>	181
6.2.3	<i>Escenario 3: Producción de biodiesel combinando aceites para mezcla B10..</i>	183
6.2.4	<i>Escenario 4: Producción de bioetanol a través de todos los ingenios azucareros</i> 185	185
6.2.5	<i>Escenario 5: Producción de biocombustibles líquidos empleando toda el área de cultivo no cultivada en El Salvador</i>	185
6.2.6	<i>Escenario 6: Producción de BD con reutilización de cascarilla de maní</i>	186
6.2.6	<i>Escenario 7: Valorización energética de cascarilla de higuierillo y tempate</i>	186
	CONCLUSIONES	188
	RECOMENDACIONES	192
	REFERENCIAS	195
	ANEXO 1	211
	<i>Procesos productivos de DB Y BE a partir de las tres materias primas principales</i>	211
	<i>Balance de materia para la producción de BD en El Salvador</i>	213
	ANEXO 3	239
	<i>Balance de materia para la producción de BE en El Salvador</i>	239
	ANEXO 4	255
	<i>Consumo de energía en la producción de BD en El Salvador</i>	255
	ANEXO 5	257
	<i>Consumo de energía en la producción de BE en El Salvador</i>	257
	ANEXO 6	259
	<i>Herramienta de cálculo</i>	259
	ANEXO 7	289
	<i>Factores de conversión</i>	289
	ANEXO 8	292
	<i>Metodología propuesta para el cálculo de huella ecológica de residuos en El Salvador</i>	292
	ANEXO 9	295
	<i>Glosario</i>	295

LISTA DE TABLAS

TABLA 2-1 BIOCOMBUSTIBLES SEGÚN TIPOS DE BIOMASA EMPLEADAS.....	24
TABLA 2-2 CARACTERÍSTICAS DEL BE	33
TABLA 2-3 CAPACIDAD INSTALADA DE LOS INGENIOS QUE OPERAN EN EL SALVADOR.....	37
TABLA 2-4 CARACTERÍSTICAS DEL BD	46
TABLA 2-5 EMPRESAS INVOLUCRADAS EN LA PRODUCCIÓN DE BD EN EL SALVADOR	56
TABLA 2-6 ESTUDIOS DE ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA REALIZADOS POR EL MINEC	60
TABLA 3-1 CARACTERIZACIÓN DE DESARROLLO SOSTENIBLE SEGÚN TEORÍAS.....	70
TABLA 3-2 TIPOS DE INDICADORES SOCIALES.....	78
TABLA 3-3 TIPOS DE INDICADORES AMBIENTALES.....	80
TABLA 3-4 TIPOS DE INDICADORES ECONÓMICOS.....	83
TABLA 3-5 FACTORES DE EQUIVALENCIA 2007	91
TABLA 4-1 PARÁMETROS DE SIEMBRA Y COSECHA DE SEMILLAS OLEAGINOSAS.....	94
TABLA 4-2 PROPIEDADES DEL ACEITE CRUDO PARA LA PRODUCCIÓN DE BODIESEL	96
TABLA 4-3 CARACTERÍSTICAS DE LOS INSUMOS Y REACTIVOS EMPLEADOS EN LA PRODUCCIÓN DE BODIESEL.....	99
TABLA 4-4 BALANCE DE MATERIA DEL PROCESO PRODUCTIVO DE BD SIN TEA	110
TABLA 4-5 BALANCE DE MATERIA DEL PROCESO PRODUCTIVO DE BD CON TEA.....	111
TABLA 4-6 BALANCE DE MASA DE PROCESO PRODUCTIVO DE BE.....	113
TABLA 4-7 INVENTARIO DE PROCESO PARA BD DE HIGUERILLO	114
TABLA 4-8 INVENTARIO DE PROCESO PARA BD DE TEMPATE.....	115
TABLA 4-9 INVENTARIO DE PROCESO PARA BD DE MANÍ.....	116
TABLA 4-10 INVENTARIO DE PRODUCCIÓN DE BE	118
TABLA 4-11 DIVISIÓN DE SUBCATEGORÍAS DEL CONSUMO ENERGÉTICO.....	120
TABLA 4-12 FACTORES DE CONVERSIÓN PARA ENERGÍA ELÉCTRICA	121
TABLA 4-13 PRODUCTIVIDAD ENERGÉTICA PARA ENERGÍA RENOVABLE	121
TABLA 4-14 PRODUCTIVIDAD DE ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	122
TABLA 4-15 TIPOS DE TERRENOS PARA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	122
TABLA 4-16 FACTORES DE ABSORCIÓN DE CO ₂	123
TABLA 4-17 MATRIZ RE RESIDUOS Y VERTIDOS	124
TABLA 4-18 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA CONSUMO DE MATERIALES EN LA PRODUCCIÓN DE BD PARTE 1	127
TABLA 4-19 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA CONSUMO DE MATERIALES EN LA PRODUCCIÓN DE BD PARTE 2	128
TABLA 4-20 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA CONSUMO DE MATERIALES EN LA PRODUCCIÓN DE BD PARTE 2	129
TABLA 4-21 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA CONSUMO DE MATERIALES EN LA PRODUCCIÓN DE BE PARTE 1	131
TABLA 4-22 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA CONSUMO DE MATERIALES EN LA PRODUCCIÓN DE BE PARTE 2	131
TABLA 4-23 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA CONSUMO DE MATERIALES EN LA PRODUCCIÓN DE BE PARTE 3	132
TABLA 4-24 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA CONSUMO DE ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE BD PARTE 1	134
TABLA 4-25 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA CONSUMO DE ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE BD PARTE 2	135
TABLA 4-26 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA CONSUMO DE ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE BD PARTE 3	136
TABLA 4-27 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA CONSUMO DE ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE BE PARTE 1	137

TABLA 4-28 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA CONSUMO DE ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE BE PARTE 2	137
TABLA 4-29 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA CONSUMO DE ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE BE PARTE 3	138
TABLA 4-30 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA RESIDUOS EN LA PRODUCCIÓN DE BD PARTE 1	140
TABLA 4-31 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA RESIDUOS EN LA PRODUCCIÓN DE BD PARTE 2	141
TABLA 4-32 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA RESIDUOS EN LA PRODUCCIÓN DE BE PARTE 1	143
TABLA 4-33 HOJA DE CÁLCULO DE HE PARA RESIDUOS EN LA PRODUCCIÓN DE BE PARTE 2	143
TABLA 5-1 HUELLA ECOLÓGICA TOTAL PARA EL PROCESO PRODUCTIVO DE BD SIN TEA	146
TABLA 5-2 HUELLA ECOLÓGICA TOTAL PARA EL PROCESO PRODUCTIVO DE BD CON TEA	146
TABLA 5-3 HUELLA ECOLÓGICA DE CONSUMOS PARA BD SIN TEA	147
TABLA 5-4 HUELLA ECOLÓGICA DE CONSUMOS PARA BD CON TEA	149
TABLA 5-5 HUELLA ECOLÓGICA DE RESIDUOS PARA BD SIN TEA	154
TABLA 5-6 HUELLA ECOLÓGICA DE RESIDUOS PARA BD CON TEA	155
TABLA 5-7 HUELLA ECOLÓGICA ESPECIFICA DE PRODUCCIÓN DE BD SIN TEA	161
TABLA 5-8 HUELLA ECOLÓGICA ESPECIFICA DE PRODUCCIÓN DE BD CON TEA	161
TABLA 5-9 HUELLA ECOLÓGICA ESPECIFICA DE PRODUCCIÓN DE BE	162
TABLA 5-10 COMPARACIÓN DE PRODUCCIÓN DE BD A PARTIR DE DIFERENTES ACEITES	162
TABLA 5-11 ESCENARIOS ALTERNATIVOS	163
TABLA 5-12 PRODUCTIVIDAD Y H.E DE LA PRODUCCIÓN DE BD A TRAVÉS DE ACEITE DE MANÍ CON REUTILIZACIÓN DE CASCARILLA	171
TABLA 5-13 PRODUCCIÓN DE BD A TRAVÉS DE TEMPATE CON VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE CASCARILLA	172
TABLA 6-1 COMPARACIÓN DE PROCESOS PRODUCTIVOS DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN TÉRMINOS DE REQUERIMIENTO EN RELACIÓN CON EL ÁREA SUPERFICIAL Y EL TERRENO OCIOSO DE EL SALVADOR	173
TABLA 6-2 PRODUCCIÓN Y ÁREA PRODUCTIVA REQUERIDA PARA BD SEGÚN MATERIA PRIMA	175
TABLA 6-3 PORCENTAJES DE LOS COMPONENTES DE LA HUELLA ECOLÓGICA PARA LOS PROCESOS PRODUCTIVOS DE LOS BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS	177
TABLA 6-4 PORCENTAJES DE LOS TERRENOS ASOCIADOS A LA HUELLA ECOLÓGICA PARA LOS PROCESOS PRODUCTIVOS DE LOS BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS	178
TABLA 6-5 PORCENTAJES DE LOS COMPONENTES DE LA HUELLA ECOLÓGICA PARA LOS PROCESOS PRODUCTIVOS DE LOS BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS	180
TABLA 6-6 PORCENTAJES DE LOS COMPONENTES DE LA HUELLA ECOLÓGICA PARA LOS PROCESOS	182
TABLA 6-7 PORCENTAJES DE LOS COMPONENTES DE LA HUELLA ECOLÓGICA PARA EL PROCESO PRODUCTIVO DE B10	184

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 ESTRUCTURA QUÍMICA DEL BE.....	29
FIGURA 2-2 PRECIOS DE GASOLINA REGULAR \$/ GAL.....	32
FIGURA 2-3 PRECIOS DE GASOLINA SÚPER \$/ GAL.....	32
FIGURA 2-4 PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DE MATERIAS PRIMAS DIVERSAS EN BE.....	35
FIGURA 2-5 REACCIÓN DE HIDRÓLISIS DE LA SACAROSA.....	35
FIGURA 2-6 REACCIÓN DE FERMENTACIÓN DE GLUCOSA/FRUCTOSA.....	36
FIGURA 2-7 DATOS DE PRODUCCIÓN DE ETANOL DEL INGENIO LA CABAÑA PERIODO 2005-2009.....	39
FIGURA 2-8 PROCESO PRODUCTIVO DE ETANOL SEGÚN POLÍTICAS Y PROGRAMAS EN EL SALVADOR.....	41
FIGURA 2-9 ESTRUCTURA QUÍMICA DEL BIODIESEL.....	42
FIGURA 2-10 PRODUCCIÓN DE BD POR CONTINENTES.....	44
FIGURA 2-11 PRODUCCIÓN, COMERCIO Y PRECIOS MUNDIALES DE BIODIESEL, CON PROYECCIONES HASTA 2017.....	45
FIGURA 2-12 PRINCIPALES PRODUCTORES DE BIODIESEL, CON PROYECCIONES HASTA 2017.....	45
FIGURA 2-13 PRECIO DE DIESEL.....	46
FIGURA 2-14 SISTEMA REACCIONANTE PARA EL MÉTODO BÁSICO A PARTIR DE ACEITE USADO.....	51
FIGURA 2-15 ESQUEMA DE LA PRODUCCIÓN DE BD EN UN PROCESO POR LOTES A PARTIR DEL ACEITE VEGETAL CRUDO.....	52
FIGURA 2-16 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE FABRICACIÓN DE BIODIESEL.....	54
FIGURA 2-17 SISTEMA REACCIONANTE PARA EL MÉTODO ÁCIDO-BASE, A PARTIR DE ACEITE USADO.....	55
FIGURA 3-1 DIAGRAMA DE VENN.....	74
FIGURA 3-2 TIPOS DE HUELLAS AMBIENTALES.....	85
FIGURA 3-3 HUELLA ECOLÓGICA DEL HOMBRE.....	86
FIGURA 3-4 TIPOS DE HUELLAS ECOLÓGICAS QUE SE LES PUEDE APLICAR UNA METODOLOGÍA ESPECÍFICA.....	89
FIGURA 4-1 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL ²	101
FIGURA 4-2 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL.....	108
FIGURA 5-1 HUELLA ECOLÓGICA PARA CONSUMOS MATERIALES EN LA PRODUCCIÓN DE BD SIN TEA ...	148
FIGURA 5-2 HUELLA ECOLÓGICA PARA CONSUMOS MATERIALES EN LA PRODUCCIÓN DE BD CON TEA.....	150
FIGURA 5-3 HUELLA ECOLÓGICA PARA CONSUMOS EN LA PRODUCCIÓN DE BE.....	151
FIGURA 5-4 HUELLA ECOLÓGICA DE ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE BD SIN TEA.....	152
FIGURA 5-5 HUELLA ECOLÓGICA DE ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE BE.....	153
FIGURA 5-6 HUELLA ECOLÓGICA DE RESIDUOS EN EL PROCESO PRODUCTIVO DE BD SIN TEA.....	154
FIGURA 5-7 HUELLA ECOLÓGICA DE RESIDUOS EN EL PROCESO PRODUCTIVO DE BD CON TEA.....	156
FIGURA 5-8 HUELLA ECOLÓGICA DE RESIDUOS EN EL PROCESO PRODUCTIVO DE BE.....	157
FIGURA 5-9 HUELLA ECOLÓGICA SEGÚN EL TIPO DE TERRENO EN EL PROCESO PRODUCTIVO DE BD SIN TEA.....	158
FIGURA 5-10 HUELLA ECOLÓGICA SEGÚN EL TIPO DE TERRENO EN EL PROCESO PRODUCTIVO DE BD CON TEA.....	159
FIGURA 5-11 HUELLA ECOLÓGICA SEGÚN EL TIPO DE TERRENO EN EL PROCESO PRODUCTIVO DE BE.....	160
FIGURA 5-12 COMPARACIÓN DE HUELLA ECOLÓGICA SEGÚN MEZCLAS DE ACEITES.....	168

NOMENCLATURA

AGL	Ácidos grasos libres
BD	Biodiesel
B10	Mezcla de diesel (90% v/v) y biodiesel (10%v/v)
B20	Mezcla de diesel (80%v/v) y biodiesel (20%v/v)
BE	Bioetanol
E10	Mezcla de gasolina (90%v/v) y bioetanol (10%v/v)
E20	Mezcla de gasolina (90%v/v) y bioetanol (10%v/v)
HE	Huella ecológica
RS	Relleno Sanitario
TEA	Transesterificación ácida
TH	Mezcla de aceite de Tempate y aceite de Higuerillo
TM	Mezcla de aceite de Tempate y aceite de Maní

RESUMEN

Se presenta la evaluación de la huella ecológica de la producción de biodiesel y bioetanol en El Salvador.

La evaluación de la producción de biodiesel se desarrolla, empleando como materia prima el aceite de higuerillo, maní y tempate, y la producción de bioetanol a través de melaza.

La producción actual de bioetanol en El Salvador es 14 veces mayor que la de biodiesel; sin embargo, la huella ecológica de este último es sólo el 23.15% de la huella ecológica de bioetanol, específicamente se tiene, que la huella ecológica de la producción de biodiesel es de 0.0085 gHa/gal y la de bioetanol 0.0027gHa/gal, con lo cual se llegó a establecer que si se decidiese producir la misma cantidad de ambos biocombustibles, lo más recomendable ambientalmente es producir bioetanol.

En la producción de biodiesel, es necesario disponer de mayor área productiva para un proceso con aceites de baja calidad que con aceites de alta calidad; entre los tres diferentes tipos de aceites analizados, el más adecuado, en términos de huella ecológica y de producción, es el aceite de tempate.

Los resultados de los componentes de la huella ecológica arrojaron que para el biodiesel, el mayor aporte es debido al consumo de materiales, específicamente por el consumo de semilla oleaginosa; mientras que en el bioetanol, el mayor aporte es por residuos, debido a las emisiones de CO₂ biogénico.

En general, los resultados obtenidos, demostraron que tanto la producción de biodiesel como la de bioetanol son sostenibles ambientalmente.

Capítulo 1 PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 INTRODUCCIÓN

La creciente importancia y el renovado interés por el manejo eficiente de los recursos energéticos, la preocupación por el medio ambiente, y la necesidad imperiosa de reducir las emisiones de carbono, han desembocado en un crecimiento acelerado de la producción y utilización de biocombustibles en muchas partes del mundo, como formas sustitutas de los combustibles de origen fósil.

El estudio de producción de los biocombustibles en la actualidad es indispensable, sobre todo para países en vías de desarrollo como El Salvador; ya que al no ser un productor de petróleo y sus derivados es necesario investigar alternativas de sustitución, métodos de producción y la sostenibilidad de los mismos según los recursos existentes.

El término “desarrollo sostenible” fue acuñado por primera vez en 1987 en el informe Brundtland de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas en su reporte Nuestro Futuro Común, en el cual fué definido como: “Satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”.

Indicadores para la evaluación de sostenibilidad, o desarrollo sostenible, han sido desarrollados desde diferentes enfoques y criterios, así puede hablarse de sostenibilidad social, económica y ambiental; basados en los criterios de sostenibilidad débil y fuerte. La sostenibilidad débil se basa únicamente en el enfoque económico y presenta una postura optimista respecto a la situación ambiental, por su parte la sostenibilidad fuerte, sostiene que la sociedad y la economía están limitadas por el ecosistema global, por lo cual interacciona con indicadores de los diferentes enfoques de sostenibilidad.

La huella ecológica, frecuentemente utilizada como un indicador de sostenibilidad, mide el área de terreno productivo y ecosistemas acuáticos requeridos para producir los recursos que la población consume y asimilar los residuos que produce, donde quiera que se encuentre la población, utilizando la tecnología prevaleciente (Saravia, 2010).

En El Salvador, se busca paliar la intensa dependencia de los combustibles fósiles, empleando principalmente biocombustibles líquidos, para lo cual se han destinado ya diversas áreas de terreno productivo para siembra de semillas oleaginosas y caña de azúcar que son la materia prima para la producción de dichos biocombustibles; sin embargo, comparado con el área total de otros países, El Salvador presenta una superficie menor, por lo cual es de vital importancia su explotación óptima, de tal forma que se lleven a cabo los procesos productivos sin afectar la disponibilidad actual y futura del ecosistema, por ello la importancia de la presente investigación, en la cual se establece la sostenibilidad ambiental de los procesos productivos de biocombustibles fósiles, haciendo uso de la huella ecológica, como indicador de sostenibilidad.

Se presenta la evaluación de sostenibilidad ambiental de los procesos actuales de producción de biocombustibles y de diferentes escenarios de producción para sustituir el consumo de combustibles fósiles.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como un desafío por parte del Centro Nacional de la Energía (CNE), de El Salvador busca promover la implementación de energías renovables para disminuir de esta manera la dependencia existente desde hace varios años de los recursos fósiles, por lo cual se han planteado diferentes procesos productivos para la generación de fuentes de energías renovables, entre los que se encuentran la producción de biodiesel y bioetanol.

Los procesos productivos en general y el consumo propio de recursos por parte de los habitantes de una nación, llevan a la escasez de los mismos o por lo menos a disminuir su existencia, El Salvador no es la excepción.

Es por lo anterior que surge la inquietud de llevar a cabo esta investigación, con el principal objetivo de evaluar la sostenibilidad ambiental de la producción de biodiesel y bioetanol en El Salvador, utilizando como herramienta la huella ecológica. El principal interés es contribuir al estudio de los biocombustibles en El Salvador, brindando resultados al respecto de la sostenibilidad ambiental. Ello puede contribuir a mejorar el panorama y la discusión sobre la conveniencia de la producción de los mismos en el país.

1.3 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la sostenibilidad ambiental de la producción de biodiesel y bioetanol en El Salvador utilizando como herramienta la metodología de huella ecológica.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar el proceso productivo de dos biocombustibles de interés en El Salvador: biodiesel y bioetanol.
- Estudiar diferentes opciones en términos de materias primas de interés para la producción de biodiesel y bioetanol.
- Aplicar a los procesos seleccionados, la metodología de evaluación de huella ecológica incorporando los avances y mejoras en la evaluación de huella ecológica de residuos.
- Establecer una comparativa de los procesos productivos de ambos biocombustibles en El Salvador utilizando Huella ecológica.

- Comparar los resultados obtenidos de este estudio en particular con la huella ecológica de la producción de bioetanol y biodiesel a escala regional y/o mundial.

1.5 JUSTIFICACIÓN

El Salvador, a pesar de ser pequeño, cuenta con efectos negativos que las emisiones de los combustibles fósiles emanan al medio ambiente. Por otra parte, también existen numerosos problemas por el continuo encarecimiento de los mismos lo que produce problemas a la economía del país.

Como una opción para contrarrestar este problema surgen los biocombustibles, los cuales como es bien sabido son a base de productos que no son petróleo y son además de una alternativa más económica, son más amigables con el medio ambiente ya que no generan un impacto negativo al mismo, al analizarlos en su ciclo completo.

Los biocombustibles ofrecen muchos beneficios. Al reducir la demanda de petróleo los biocombustibles podrían volver más seguro el abastecimiento de energía. Su uso también reduciría los costos de importación al país y ofrecería mejores balanza comercial y balanza de pagos. Todos estos desarrollos descongelarían la escasez de recursos para otras necesidades apremiantes. Las emisiones de gases invernadero, monóxido de carbono y particulados podrían reducirse de forma significativa (Olende, 2007)

En el caso del bioetanol y el biodiesel es de importancia el poder estudiar su impacto en el momento de la producción de los mismos, aunque se conoce que en su ciclo completo son de impacto positivo para el medio ambiente (RES, 2011).

Existen también métodos de cálculo los cuales, a través de los estudios realizados, nos permiten poder hacer cálculos medioambientales para ver el impacto que genera una actividad que se está realizando. De ahí que surgen

alternativas de herramientas como la huella ecológica la cual permite evaluar la sostenibilidad de una actividad para con el medio ambiente.

La huella ecológica es un indicador para lograr medir, estimar o evaluar el impacto que tienen sobre el medio ambiente todas las actividades que realizamos considerando sus contextos específicos y condiciones particulares. (Sánchez, 2009)

Del uso desmedido y contaminación de los recursos nacionales surge la necesidad de efectuar el cálculo por medio de este indicador para los biocombustibles que se están actualmente produciendo en El Salvador, como una manera de evaluar el impacto que estos generan y evaluar si son o no una alternativa sostenible para el país, para poder potenciarlos como una buena opción que además de ser viable económicamente ya que se producen, la mayoría, a través de plantas nativas de muy bajo costo de mantenimiento para el crecimiento de las mismas, como una buena opción para el medio ambiente.

1.4 ALCANCES

- Se investigarán los procesos productivos de biodiesel y bioetanol que actualmente se utilizan en Salvador, modelando el proceso más utilizado para cada caso.
- Se establecerán los correspondientes balances de materia y energía para la producción de biodiesel a partir de los aceites vegetales más estudiados para la producción en El Salvador, entre otros: tempate (jatropha), higuerrillo (castor), maní, etc. Asimismo, considerando la producción de bioetanol asociada al cultivo de la caña de azúcar.
- Se evaluará la huella ecológica del proceso de producción de bioetanol y biodiesel con las condiciones predominantes en Salvador.

- Dadas las diferentes propuestas a nivel internacional para la evaluación de huella ecológica de residuos, se seleccionará y aplicará la que se considere más apropiada para cada uno de los casos.
- La comparativa regional y/o mundial de los procesos productivos de biodiesel y bioetanol se hará en base a los resultados que esta investigación arroje frente a los resultados de otros estudios de esta misma naturaleza.

1.5 LIMITACIONES

- La limitante más importante gira en torno a la falta de información y/o acceso a la información que pueda existir en medio del desarrollo de la investigación.
- De no contar con la información precisa se realizarán los inventarios de procesos en base a las alternativas identificadas más convenientes para cada caso según el estado actual de la región.
- Siendo que ésta es la primera aproximación al cálculo de la huella ecológica de biocombustibles en El Salvador, en el desarrollo del estudio sin duda, habrá muchas lagunas en términos de factores a utilizar y elementos asociados a la aplicación de la metodología considerada. Dado que el estudio se pretende adecuar lo más posible a la realidad nacional y en el caso de no encontrar y ser imposible de generar la información, se utilizarán aquellos reportados en la comunidad científica que aborda este tema.

Capítulo 2 BIOCOMBUSTIBLES

Los biocombustibles juegan actualmente un papel importante dentro de la matriz energética de algunos países, ya que además de brindar su aporte energético y contribuir al desarrollo, son amigables con el medio ambiente. El bioetanol (BE) junto con el biodiesel (BD) constituyen los dos grandes biocombustibles líquidos de la actualidad. (GAIA, 2008)

Los biocombustibles pueden definirse como:

Sustancias energéticas de origen biológico obtenidas de manera renovable a partir de material vegetativo y restos orgánicos los cuales son utilizados como combustibles para propósitos múltiples. (CNE, 2011)

A su vez, biomasa es definida como:

Material biológico derivado de los organismos vivos y sus desechos. Para fines energéticos, la biomasa utilizada es a menudo materia a base de plantas, pero la biomasa igualmente puede aplicarse tanto a materia de origen animal como vegetal. (Biomass energy center, 2011)

En términos generales, la biomasa se refiere a toda aquella materia orgánica, que no procede de recursos fósiles, son hidrocarbonadas y que ha conseguido la reducción de hidrógeno y carbono mediante la fotosíntesis, por ello se presenta de forma periódica y no limitada con el tiempo, es decir que es un material energético renovable. (Fernández, 2006)

Por su importancia energética, la biomasa se clasifica en natural, residual y cultivos energéticos; de ella se pueden producir diversos combustibles, tanto en estado sólido, líquido como gaseoso (EE, 2009), tal como se muestra en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1 Biocombustibles según tipos de biomasa empleadas

Tipo de biomasa		Biomasa	Combustible	Estado
Natural		Material Lignocelulósico	Leña, paja y astillas.	Sólido
Residual	Seca	<ul style="list-style-type: none"> • Material Lignocelulósico: agricultura, tala y poda de árboles • Industria de la madera • Agroindustria: beneficios y torrefactoras de café, arroz, ingenios azucareros 	Leña, fibra combustible, carbón vegetal y BE por fermentación e hidrólisis.	Sólido y líquido
	Húmeda	<ul style="list-style-type: none"> • Aguas residuales urbanas y excretas humanas • Aguas residuales industriales • Residuales ganaderos: excretas de ganado, purrín • Residuales orgánicos alimenticios: grasas de ganado y de aves de corral 	Biogás, gas de gasógeno, y BD.	Gas y líquido
Cultivos energéticos		<ul style="list-style-type: none"> • Cultivos ya existentes: granos básicos y semillas oleaginosas • Lignocelulósicos forestales: cedro, pino, eucalipto, sauce y árboles frutales • Lignocelulósicos herbáceos: café, bambú, zacate y junco • Otros cultivos: higuierillo y tempate 	Fibra combustible, aceite, biodiesel, etanol, hidrógeno, leña y aceites de pirolisis.	Sólido, líquido y gaseoso

Fuente: Zelaya (2007).

Además de la importancia energética de la biomasa los combustibles, como tales, se pueden clasificar de acuerdo a diferentes generaciones como se detalla en el apartado a continuación.

2.1 BIOCOMBUSTIBLES DE PRIMERA, SEGUNDA. TERCERA Y CUARTA GENERACIÓN

Los biocombustibles son clasificados de acuerdo a la materia prima con que se producen y la tecnología aplicada para su producción. Esta clasificación se realiza por generaciones que, hasta la fecha, son cuatro: (Alternative Energy, 2014)

a) Biocombustibles de primera generación.

Estos biocombustibles fueron los primeros producidos y son los que generan mayor preocupación ya que utilizan como materia prima cultivos alimentarios; se caracterizan por su facilidad de procesamiento y sus bajas o nulas emisiones de gases de efecto invernadero. (RV, 2011)

Este tipo de biocombustible es viable a corto plazo ya que es limitado el uso de las tierras agrícolas para cultivos que luego se emplean en fabricar biocombustibles sin que se genere inseguridad alimentaria o problemas de precios de los alimentos para los sectores más pobres de la población. (Ramírez, 2010)

La materia prima con la que se producen es agrícola: caña de azúcar, granos de maíz, y diversos aceites, además se pueden utilizar grasas animales, aceites de desechos domésticos y desperdicios sólidos urbanos. (AYD, 2011)

La tecnología utilizada para la producción de combustibles de primera generación es la fermentación (para azúcares y carbohidratos), la transesterificación (para aceites y grasas) y la digestión anaeróbica (para los desperdicios orgánicos). (Ramírez, 2010)

Ejemplo de biocombustibles de primera generación son el etanol, metano y n-butano producidos a partir de azúcares y el BD elaborado de aceites vegetales comestibles. (RV, 2011)

b) Biocombustibles de segunda generación.

Son combustibles producidos a partir de materias primas que no son fuentes alimenticias, para lo cual se utilizan tecnologías que todavía están en etapas de investigación y desarrollo y con costos de producción aún muy elevados. (CNE, 2011)

Los insumos de producción son los residuos agrícolas y forestales compuestos principalmente de celulosa. Ejemplo de ellos son el bagazo de caña de azúcar, el rastrojo de maíz, paja de trigo, aserrín, hojas y ramas secas de árboles, entre otros. (Biocombustibles avanzados USA, 2011)

Los procesos para obtener combustibles de segunda generación son más complejos que los implementados para los de primera generación, por ejemplo se aplica la sacarificación-fermentación y el proceso Fischer-Tropsch, este último recibe el nombre de gas a líquido (GTL) y biomasa a líquido (BTL) respectivamente, los cuales consisten en la gasificación del carbón y de la materia lignocelulósica de la biomasa, para su posterior sintetización. (Anderson, 2010)

Las ventajas de los biocombustibles de segunda generación son que en principio, requerirán menos recursos (fertilizantes, pesticidas, agua, terrenos, etc.) para ser producidos. Al disponer de una mayor variedad de materias primas y no ser comestibles, no generarán competencia con la industria alimenticia. En algunos casos, podrán servir para recuperar terrenos erosionados en laderas o zonas desertificadas y fijar CO₂ a través de su sistema de raíces. A largo plazo, pueden abaratar los costes de producción respecto a los actuales biocarburantes. (Willstedt, 2009)

Entre los biocombustibles de segunda generación se encuentran: etanol, metanol, gas de síntesis (mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno), BD y el 2,5-dimetilfurano. (Medina, 2013)

c) Biocombustibles de tercera generación.

Son los biocombustibles que también proceden de especies no comestibles, se obtienen a partir de desechos, la diferencia con los de segunda generación es la biotecnología que se utiliza, también son conocidos como los biocarburantes avanzados. (UBV, 2007)

Las materias primas son vegetales no alimenticios, de rápido crecimiento y con una alta densidad energética almacenada en sus componentes químicos, por lo que se les llama cultivos energéticos. Entre ellos se tienen: pastos perennes, árboles y plantas de rápido crecimiento, las algas verdes y verde azules. (Maciel, 2012)

Los procesos productivos de los biocombustibles de tercera generación se encuentran aún en desarrollo, aunque se ha logrado producir BD y BE. (Biocombustibles avanzados USA, 2011)

La mayor ventaja en su producción es la captura de dióxido de carbono (CO₂) para la producción de insumos y disminución de gases efecto invernadero, pero su desventaja es la utilización de tierras de cultivos de alimentos para sembrar los insumos, con excepción de las algas. (Maciel, 2012)

Los biocombustibles más utilizados son los de primera generación, aunque hay un gran debate de que esta técnica eleva los precios de los productos que se utilizan, como el maíz, los biocombustibles de tercera generación, aún no tienen precios competitivos y todavía se encuentran en desarrollo. (UBV, 2007)

d) Biocombustibles de cuarta generación.

Los biocombustibles de cuarta generación son aquellos que tienen como objetivo principal crear un ciclo de emisiones cero (o incluso negativo) en su proceso de

obtención. Un aspecto fundamental son sus fuentes de biomasa, compuesta de cultivos de materiales lignocelulósicos genéticamente modificados con el fin de lograr un rendimiento energético mayor, más velocidad de crecimiento y mayor capacidad de fijación de CO₂. (Navarro, 2006)

Son producidos a base de bacterias genéticamente modificadas, las cuales utilizan dióxido de carbono (CO₂) u otra fuente de carbono para la producción de biocombustibles. Durante el proceso productivo la bacteria es la que efectúa la totalidad de la producción, a diferencia de combustibles de generaciones anteriores que se emplean bacterias y organismos genéticamente modificados como insumo de producción. (Maciel, 2012)

Actualmente, esta generación de biocombustibles se encuentra en etapa de investigación, únicamente se conoce la posible ruta de síntesis para el etanol a partir de dióxido de carbono; sin embargo, depende totalmente de la información genética de la bacteria artificial y puede tener limitaciones termodinámicas importantes. (Álvarez, 2009)

La ONU, en varios informes muestra su preocupación por evitar crisis alimenticias globales y fomentar el uso y producción de biocombustibles por lo que recomienda a los países y empresas el desarrollo de los tipos de combustibles a mediano y largo plazo. (RV, 2011)

Se están logrando importantes avances tecnológicos en los de segunda y tercera generación ya que son los más aptos para reemplazar a los combustibles fósiles que dominan hoy el mercado. (RV, 2011)

Es importante aprovechar los beneficios de la bioenergía sin crear nuevos problemas sociales y ambientales. (RV, 2011)

Dado que una gran fracción del petróleo (70-80%) se consume en la producción de combustibles líquidos para el sector del transporte, una eventual sustitución de este recurso fósil por la biomasa conllevará necesariamente el desarrollo de tecnologías para la síntesis de combustibles derivados de este recurso renovable, los llamados biocombustibles. (Luque, 2011)

De ellos los líquidos son el biodiesel y el bioetanol que se describen en los numerales a continuación.

2.2 BIOETANOL

El BE o alcohol etílico es un líquido cuya forma química es C_2H_5OH (Figura 2-1), que se produce por la fermentación de cultivos agrícolas que contienen azúcares, almidones o celulosas. (Arias, 2014)

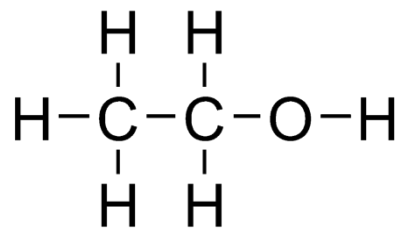


Figura 2-1 Estructura química del BE.

Es obtenido por la fermentación de la materia orgánica y la biomasa rica en hidratos de carbono (azúcares). (Escardino, 2013)

Además de usarse con fines culinarios (bebida alcohólica), el bioetanol se utiliza ampliamente en muchos sectores industriales y en el sector farmacéutico, como excipiente de algunos medicamentos y cosméticos (es el caso del alcohol antiséptico 70° GL y en la elaboración de ambientadores y perfumes). Es un buen disolvente, y puede utilizarse como anticongelante. También es un desinfectante.

Su mayor potencial bactericida se obtiene a una concentración de aproximadamente el 70%. La industria química lo utiliza como compuesto de partida en la síntesis de diversos productos, como el acetato de etilo (un disolvente para pegamentos, pinturas, etc.), el éter dietílico, etc. También se aprovechan sus propiedades desinfectantes. (Chicas, 2009)

El bioetanol se emplea como combustible industrial y doméstico. En el uso doméstico se emplea el alcohol de quemar. Éste, además, contiene compuestos como la pirovidos exclusivamente en alcohol. Esta última aplicación se extiende también cada vez más en otros países para cumplir con el protocolo de Kyoto. (Chicas, 2009)

2.2.1 Generalidades como combustible

El uso del BE comenzó en el año 1908, cuando Henry Ford diseñó su primer automóvil, en el cual utilizó etanol de maíz como combustible. Para la década de 1920 inició su comercialización en Estados Unidos aplicando un 25% de etanol de maíz en la gasolina, no obstante los altos precios del maíz, combinado con dificultades de almacenamiento y transporte, llevaron a concluir el proyecto. (Zelaya, 2007)

En la década de 1930, Henry Ford y varios expertos reunieron esfuerzos y lograron construir una planta de fermentación para producir etanol a partir de maíz y usarlo como combustible de motores, al que llamaron gasohol, con lo que se potencializó el uso de este biocombustible. Finalmente en la década de 1940, la disminución de los precios del petróleo llevaron al cierre de la planta de producción de etanol, y el gasohol fue reemplazado por las gasolinas, sin embargo, debido a la crisis del petróleo, a partir de 1980 se buscan alternativas de sustitución de este último, en las cuales el BE juega un papel importante. (Zelaya, 2007).

En el año de 1979, Brasil produjo los primeros automóviles que podían funcionar con alcohol hidratado (95% de etanol y 5% de agua), luego en 1980 la mayor parte de los vehículos fabricados estaban diseñados para funcionar exclusivamente con etanol. (GAIA, 2008)

El etanol se puede emplear en diferentes proporciones en conjunto con las gasolinas; sin embargo, las más utilizadas a nivel mundial son el 5% y el 10% (E5 y E10) sin necesidad de realizar modificaciones a los motores. La legislación europea por su parte permite el empleo del E5, en Estados Unidos se emplea en la mayoría de vehículos E10. (GAIA, 2008)

En Europa, el BE se utiliza principalmente para producir Éter Ter Butil Éter (ETBE), el cual es un aditivo para mejorar la oxigenación de la mezcla con gasolina, favoreciendo la combustión, es decir aumentando la calidad antidetonante (octanaje). (GAIA, 2008)

La aplicación del BE a nivel mundial es la mezcla directa con la gasolina sin necesidad de aditivos y en proporciones cada vez más elevadas. (GAIA, 2008)

- **Mercado mundial del bioetanol.**

Según datos del estudio sobre biocombustibles publicado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) en el año 2011 Brasil y Colombia son los únicos países latinoamericanos que figuran entre los principales productores de BE del mundo.

Desde el año 2000 la producción mundial de biocombustibles líquidos ha crecido a un ritmo anual de 10%, totalizando un 90.187 millones de litros en 2009. De ese total, 82% corresponde a BE y 18% a biodiesel.

Brasil es el segundo productor de BE del mundo, con 33.2% de participación en el mercado, detrás de Estados Unidos, responsable de 54.7% de la producción

mundial y Colombia figura en el décimo lugar de países productores con 0.4%. (CEPAL, 2011)

Por otra parte se tiene en los gráficos a continuación la fluctuación de los precios de la gasolina regular y súper en galones a lo largo del tiempo.

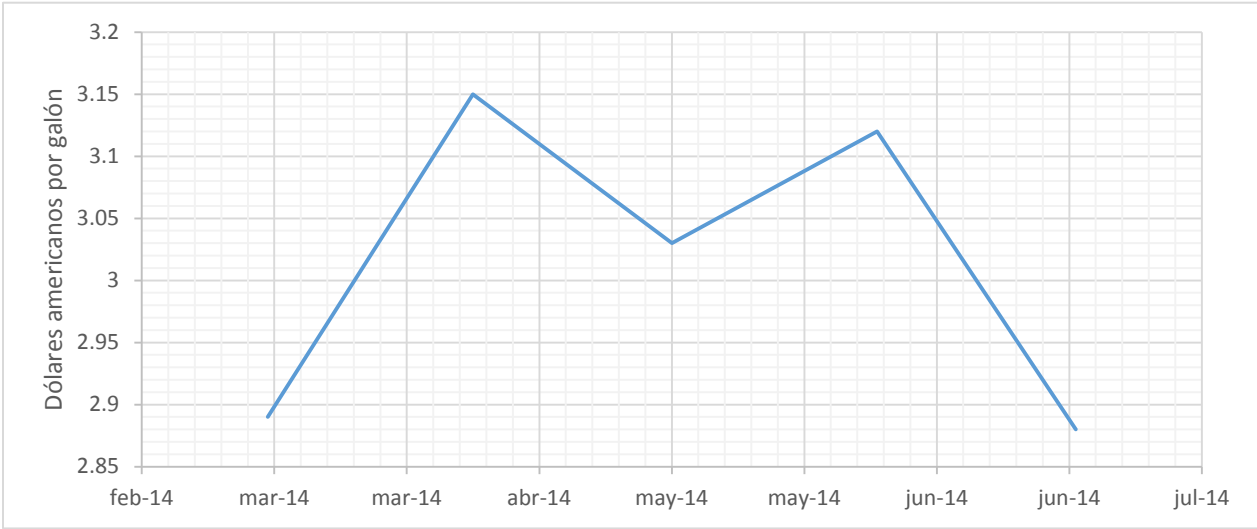


Figura 2-2 Precios de gasolina regular \$/ gal

Fuente: US Índex Mundi 2 (2014).

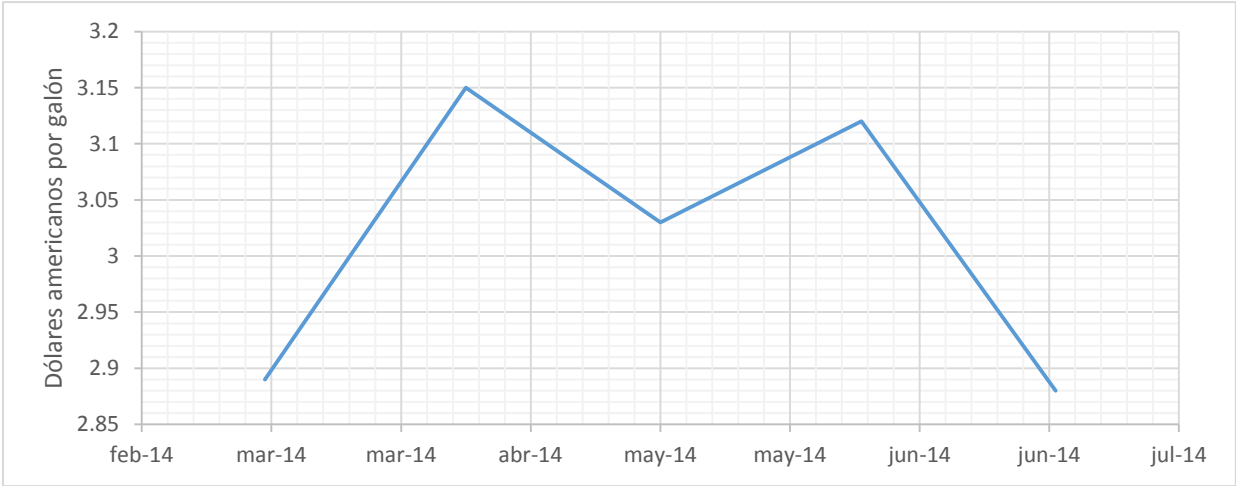


Figura 2-3 Precios de gasolina súper \$/ gal

Fuente: US Índex Mundi 2 (2014).

- **Características ambientales, económicas y sociales del bioetanol.**

El BE cuenta con diferentes características clasificadas desde el punto de vista ambiental, económico y mecánico, en las cuales se resalta las ventajas del uso del mismo en comparación con su derivado del petróleo. (Tabla 2-2).

Tabla 2-2 Características del BE

Aspecto	Características
Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada concentración de oxígeno, que representa cerca del 35% de la masa de etanol. • Reducción de las emisiones contaminantes. • Produce menos bióxido de carbono al quemarse que la gasolina, pero el impacto total depende del proceso de destilación y la eficiencia de los cultivos. • Genera menores emisiones de monóxido de carbono cuando se usa como aditivo de la gasolina. • Fuente renovable. • Reducción de emisiones de ozono. • Notablemente genera menos emisiones de monóxido de carbono.
Económicos	<ul style="list-style-type: none"> • Es más caro que la gasolina (alrededor de 1.5 veces). • Contiene dos terceras partes de la energía contenida por el mismo volumen de gasolina. • Disminución
Mecánicos	<ul style="list-style-type: none"> • Combustión más limpia y un mejor desempeño de los motores (ciclo Otto). • Mezclas con concentraciones de hasta 10% de etanol, se pueden utilizar los motores convencionales a gasolina sin cualquier ajuste. • Motores flexibles (Flex-fuel vehicle sus sigla FFV) pueden utilizar mezclas con cualquier concentración de etanol. • Es un combustible líquido y puede ser manejado tan fácilmente como la gasolina y el diésel. • Presenta un alto índice de octano: 105. • Resulta menos inflamable que la gasolina. • Baja toxicidad.

Aspecto	Características
	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta problemas de corrosión de partes mecánicas y sellos. • Presenta dificultades para encender en climas fríos.

Fuente: CONAE (2008).

2.2.2 Materia prima

El BE puede obtenerse a partir de tres tipos de materias primas (Zelaya, 2007):

- a) **Cultivos y materiales con alto contenido de sacarosa:** Como la caña de azúcar, la remolacha azucarera, el sorgo dulce y las melazas, entre otros.
- b) **Cultivos amiláceos con alto contenido de almidón:** Como los cereales (maíz, sorgo granífero, trigo y cebada) o raíces y tubérculos (mandioca, papa, batata, etc.), o de inulina (topinambur, agave, ñame, etc.).
- c) **Materias primas y cultivos con alto contenido de celulosa (lignocelulósicos).** Cuyos carbohidratos se encuentran en formas más complejas (madera, residuos agrícolas y forestales, cultivos lignocelulósicos, material herbáceo, etc.)

2.2.3 Procesos productivos

La producción de BE se da por la fermentación, que es un cambio químico en las sustancias de materia orgánica llevada a cabo por la acción de enzimas. Sustancias orgánicas complejas se transforman en sustancias más simples. (Zelaya, 2007)

La fermentación de los azúcares contenidos en la materia prima da lugar a la obtención del alcohol con aproximado 5% de agua. El cual después de destilarlo, puede ser utilizado como combustible. (Zelaya, 2007)

La Figura 2-4 describe el proceso de obtención de BE a partir de las materias primas mencionadas en el apartado anterior:

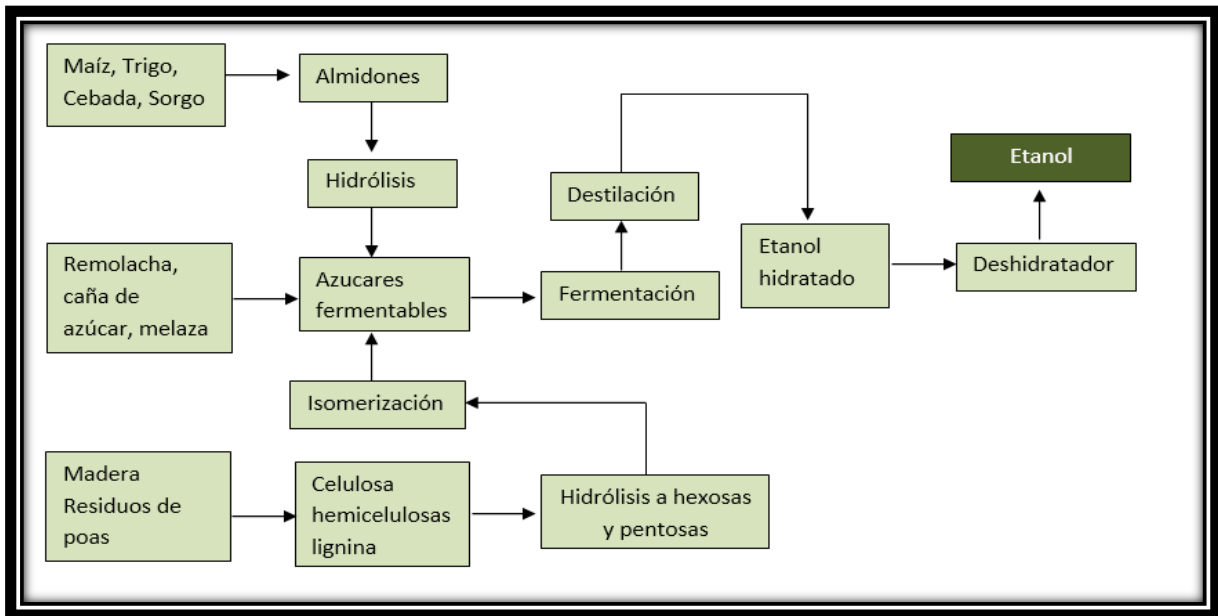


Figura 2-4 Proceso de transformación de materias primas diversas en BE

Fuente: Zelaya (2007).

Para cada uno de estos tres tipos de materiales se muestra los diferentes procesos de producción del BE, Anexo 1.

En los pasos para la fermentación, de los azúcares se tomara como ejemplo la fermentación de la base sacarosa mostrada en la Figura 2-4. Dichos pasos son los siguientes:

- a) **Hidrólisis:** La sacarosa es hidrolizada en la glucosa y fructuosa a partir de la enzima llamada invertasa que contienen las levaduras:

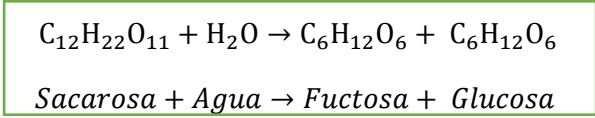


Figura 2-5 Reacción de hidrólisis de la sacarosa

Fuente: Zuloeta (2008).

b) Fermentación: Posteriormente la glucosa y la fructosa, son fermentadas por la levadura (*Saccharomyces cerevisiae*, la más eficiente en la fermentación de azúcares de seis carbonos como es el caso de la glucosa), en esta etapa se obtiene Etanol y Dióxido de Carbono:

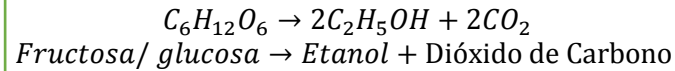


Figura 2-6 Reacción de fermentación de glucosa/fructosa

Fuente: Zaratuste (2013)

La caña de azúcar es la fuente más atractiva para la producción de etanol, ya que los azúcares que contiene son simples y fermentables directamente por las levaduras. El mayor inconveniente asociado a la caña de azúcar, es que resulta costoso como materia prima. Los cultivos como el maíz son ricos en almidón, un hidrato de carbono complejo que necesita ser primero transformado en azúcares simples. Este proceso se denomina sacarificación, e introduce un paso más en la producción, con la consecuencia del aumento en los costos (Consejo Argentino para la Información y Desarrollo de la Biotecnología, 2007)

Asimismo, la producción de etanol puede realizarse a partir de desechos agrícolas, forestales, industriales o municipales. Las materias primas ricas en celulosa, como los desechos agrícolas y forestales son las más abundantes y baratas, sin embargo la conversión de la celulosa en azúcares fermentables es un proceso complejo y costoso que hace que la obtención de etanol a partir de desechos no sea rentable, al menos para el 2007. (Zelaya, 2007)

2.2.4 Producción en El Salvador

El Salvador tuvo una primera experiencia con la producción de etanol a partir de la caña de azúcar en los años 80. Se importaron cuatro destilerías de Venezuela; sin embargo, sólo dos de ellas fueron instaladas y operaron por un corto período. La experiencia fracasó por diversos motivos como la caída en los precios del petróleo

y la falta de una planificación e información al usuario. En el año 2006 se inició la fabricación de etanol con la reactivación de una destilería en el Ingenio La Cabaña. Para el año 2010 la capacidad instalada era de 120,000 litros por día con una capacidad de almacenamiento de hasta 2.5 millones de litros de etanol. (FUNDE, 2010)

En El Salvador la producción del etanol se da a partir de la industria de la caña de azúcar la cual ofrece un mayor rendimiento por hectárea y un mejor balance energético que el producido a partir de maíz o yuca. (BNDES, CGEE, FAO y CEPAL, 2008).

La cadena productiva de etanol en El Salvador comprende dos fases:

- Fase agrícola
- Fase industrial

a) Fase 1: Agrícola.

El producto único de la etapa agrícola es la caña de azúcar, que tiene varias fases desde antes de cultivar la semilla hasta cortar el tallo de la caña dulce.

La caña de azúcar en El Salvador representa alrededor de un 20% del PIB agropecuario y es el cultivo al que se le dedica la mayor cantidad de área del país (3%). Actualmente se encuentran en operación seis ingenios (Tabla 2-3), de los cuales se encuentran tres en la zona central, dos en la zona occidental y uno en la zona oriental. Los dos mayores ingenios, Central Izalco y El Ángel, poseen un 53% de la capacidad instalada para procesamiento de caña en el país. (Caballero Ramírez & Zelada Lopez, 2004)

Tabla 2-3 Capacidad instalada de los ingenios que operan en El Salvador.

Ingenio	Capacidad Instalada (Tonelada corta/ día de molienda)
Izalco	12,000

Ingenio	Capacidad Instalada (Tonelada corta/ día de molienda)
El Ángel	10,000
Chaparrastique	5,500
La Cabaña	5,500
Jiboa	4,500
La Magdalena	3,500

Fuente: CEPAL (2007).

b) Fase 2: Industrial.

La etapa industrial, que en un principio estuvo basada en productos como la panela y el pan de azúcar para llegar después a la azúcar sulfatada y por último a la azúcar refinada, tiene también diversas operaciones desde la molienda de la caña hasta la obtención del producto de interés, para este caso, el etanol. (Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística, 1997)

En la actualidad, el único ingenio azucarero que se encuentra produciendo etanol es el ingenio La Cabaña, en el cual se reactivó una destilería de más de 19 años de antigüedad. (Lefèvre, 2010)

Tiene una capacidad de 120 mil litros diarios e inició sus operaciones en la zafra 2005-2006. La planta fabrica etanol a partir de mieles finales (melazas) propias y compradas a otros ingenios. Con la melaza procesada en el ingenio, sólo podría operar con una capacidad de 60,000 litros. (Lefèvre, 2010)

2.2.5 Panorama de producción y uso en El Salvador

La producción de etanol en El Salvador, como ya se hizo mención se realiza a través del ingenio La Cabaña, utilizando la melaza del proceso productivo del azúcar.

La producción de etanol en el ingenio La Cabaña desde el año 2005 al 2009 se muestra en la Figura 2-7.

Se observa un incremento a partir del periodo 2005-2006 donde se producían menos de 1000 Millones de litros hasta cerca de 15000 millones de litros correspondientes al periodo 2008-2009.

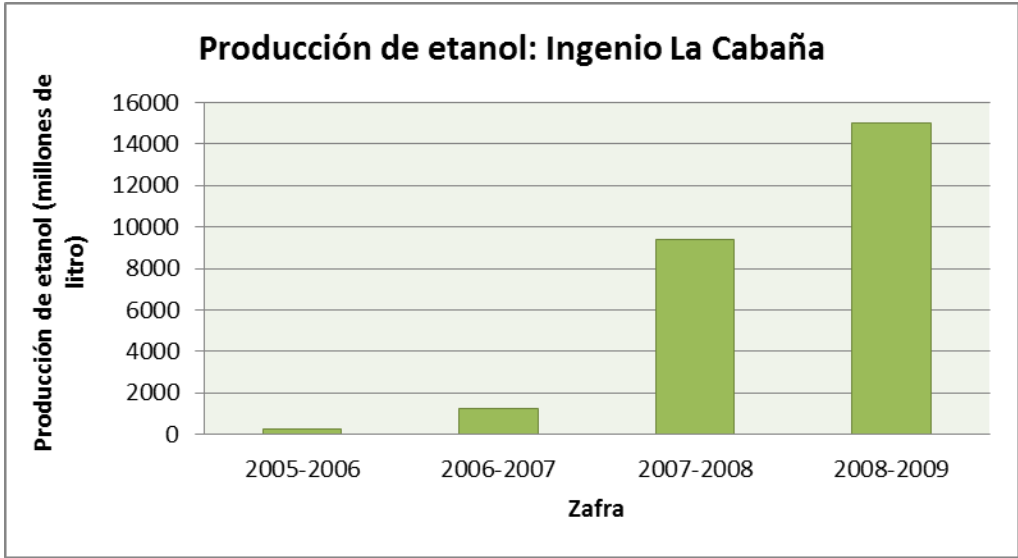


Figura 2-7 Datos de producción de etanol del ingenio La Cabaña periodo 2005-2009
Fuente: Lefèvre (2010).

Dos plantas deshidratadoras de etanol American Renewable Fuel Suppliers (Suministros de Combustibles Renovables Americanos, ARFS) y gasohol, están funcionando en El Salvador. Estas empresas importan etanol hidratado (alcohol puro hidratado) de países productores como Brasil y China (entre otros) y realizan el proceso de deshidratación para luego vender el etanol anhidro a mercados como Estados Unidos y Europa, aprovechando las ventajas fiscales que se dan a El Salvador por medio de los tratados internacionales como el Acuerdo de América Central y República Dominicana de Libre Comercio (CAFTA) y el Programa Sistema General de Preferencias (SGP) de la Unión Europea. (MINEC, 2011)

Actualmente, no hay consumo local de bioetanol como combustible. El país carece de una política que promueva la producción y el consumo masivo para dicho uso en el territorio nacional. Una ley de etanol, que establece la mezcla obligatoria E10 permitiría crear y consolidar un mercado de etanol combustible para transporte, con una oferta (productores de etanol) y demanda (consumidores). En estas condiciones el ingenio La Cabaña podría responder a la demanda local. El etanol podría venderse directamente a las empresas refinadoras e importadoras de petróleo, que estarían en la obligación de proporcionar el combustible con el nivel de mezcla acordado. (MINEC, 2011)

En el año 2007 el Ministerio de Economía publicó el documento: Políticas y Programas de Fomento de los Biocombustibles en El Salvador, la cual tiene como objetivo fomentar la producción, comercialización y consumo de biocombustibles en El Salvador. (MINEC, 2011)

Con esta política se pretende, emplear etanol producido a partir de soluciones azucaradas o de almidones, bajo el diagrama productivo de la Figura 2-8, proponiendo que el etanol sustituya el 10% de la demanda actual de gasolina en el país. Es decir, que se impulsa la formulación legal obligatoria del 10% de etanol en las gasolinas.

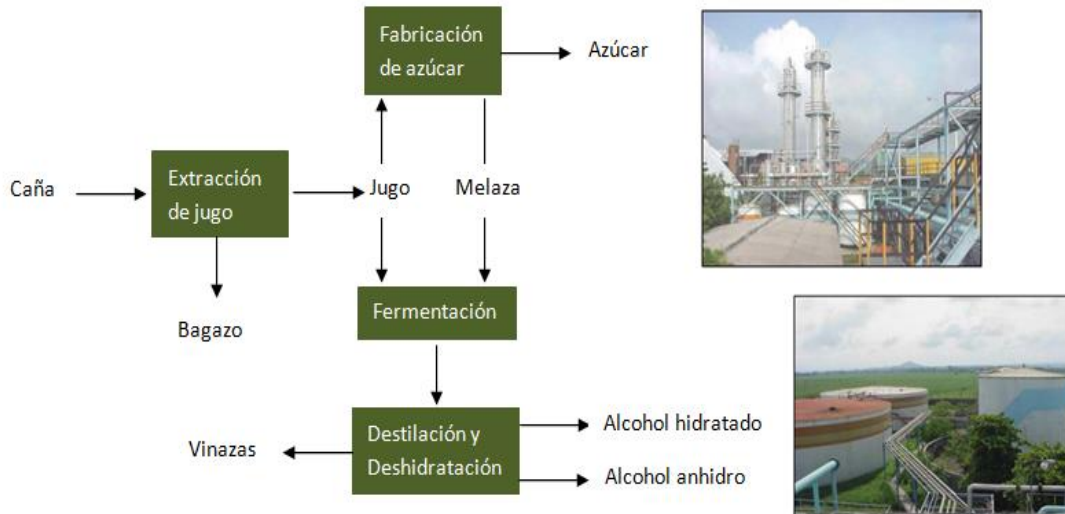


Figura 2-8 Proceso productivo de etanol según Políticas y Programas en El Salvador.

Fuente: Rivas (2007).

2.3 BIODIESEL

El BD es un combustible renovable que se puede obtener principalmente a partir de aceites vegetales, aceites/grasas animales, así como de aceites reciclados.

Presenta una ventaja ecológica, en comparación con el diesel de origen fósil, al reducir las emisiones de gases que provocan el efecto de invernadero. Así, por ejemplo, el uso de una tonelada de biodiesel, evita la producción de 2.5 toneladas de dióxido de carbono (CO₂) y sobre todo elimina, si se usa el BD sólo en los motores, las emisiones de azufre (SO₂) del diesel, evitando las lluvias ácidas; además es un combustible renovable y no finito como los hidrocarburos. (Vargas, 2007)

Físicamente es un líquido que puede tener un color que puede ir desde un tono amarillo claro hasta uno oscuro, y que es prácticamente inmiscible con el agua; además de tener una viscosidad similar a la del diesel que se obtiene del petróleo, se puede mezclar con éste con la finalidad de reducir las emisiones contaminantes

de los vehículos automotores con motores de ciclo diesel. En la Figura 2-9 se muestra la estructura química del biodiesel (Vargas, 2007), donde R son cadenas carbonadas saturadas y R' representa una cadena de carbonos no saturada.



Figura 2-9 Estructura química del biodiesel.

2.3.1 Generalidades como combustible

El Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA, 2006) define al BD como:

Toda mezcla de mono-alquil ésteres de ácidos grasos, provenientes de aceites o grasas de origen vegetal o animal, designado como B100.

El término bio hace referencia a su naturaleza renovable y biológica; mientras que diesel se refiere a su uso en motores de este tipo. El BD puede ser usado en forma pura o mezclado con diesel de petróleo obteniendo rendimientos muy similares con una menor contaminación. (Leone, Et. Al., 2002)

El conocimiento sobre BD no se considera novedad ya que este data desde tiempo pasado como se describe:

- a) Fines del Siglo XIX:** Rudolf Diesel (1858-1913) un ingeniero alemán, inventa el motor de combustión que utiliza fuel oíl y a partir de allí implementó tempranas versiones de una máquina que utilizaba aceite de maní como energía.
- b) 1970:** El BD se desarrolló de forma significativa a raíz de la crisis energética y el elevado costo del petróleo.
- c) 1982:** En Austria y Alemania, se llevaron a cabo las primeras pruebas técnicas con este combustible vegetal.

- d) **1985:** En Silberberg (Austria) se construyó la primera planta piloto productora de BD a partir de las semillas de colza o canola.
- e) **En la actualidad:** Países como Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Malasia y Suecia son pioneros en la producción, ensayo y uso de BD en automóviles. (Ballesteros, 2006). Siendo el único combustible alternativo que puede utilizarse directamente en cualquier motor diesel, sin requerir ningún tipo de modificación (Martínez Anaya, Ponce Portillo, & Reyes Gutiérrez, 2007).

El BD se puede emplear en conjunto con el diesel siendo las mezclas más comunes la de 2% de BD y 98% de diesel de origen fósil (B2), 5% de BD y 95% de diesel fósil (B5), así como la 20% de BD con un 80% de diesel de origen fósil (B20) y que pueden usarse generalmente sin modificar el motor, sin embargo también se puede emplear un 100% de BD, pero son necesarias ciertas modificaciones del motor que le permitan evitar problemas de mantenimiento y de desempeño. (Saval, 2012)

La mezcla de BD más utilizada en EE.UU. es B20 y en otros países se comercializa con amplia aceptación tanto el B20 como el B100. En España existen diversas marcas y distribuidores que ofrecen BD con mezclas que se acercan a los estándares internacionales de B20 y B100. (Ganduglia, 2009)

En países como Alemania y Austria hay más de 1800 gasolineras que incorporan un surtidor de BD (ya sea 100% o mediante una mezcla del 2% al 30% de BD y el resto diesel fósil). (Clarimón, Fernández, & Sánchez, 2005)

- **Mercado mundial del biodiesel**

La producción de BD procede principalmente de la Unión Europea (Infinita Renovables, 2010). Según los datos del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA) en los últimos nueve años, la producción mundial de BD se ha multiplicado por diez, hasta alcanzar los 15000 millones de litros al año 2009.

Europa lideró el mercado de BD en 2009, con una cuota de producción del 49.8%. El segundo puesto lo ocupó el continente americano con una cuota cercana al 33%. Los cinco principales países productores a nivel mundial durante el año 2009 fueron Alemania, EE.UU, Francia, Argentina y Brasil, que en su conjunto produjeron el 68.4% del total del BD del mundo. Australia es el mayor productor en la región Asia-Pacífico, seguido de China y la India. En la Figura 2-10 se detalla la producción de BD por continentes. (Infinita Renovables, 2010)

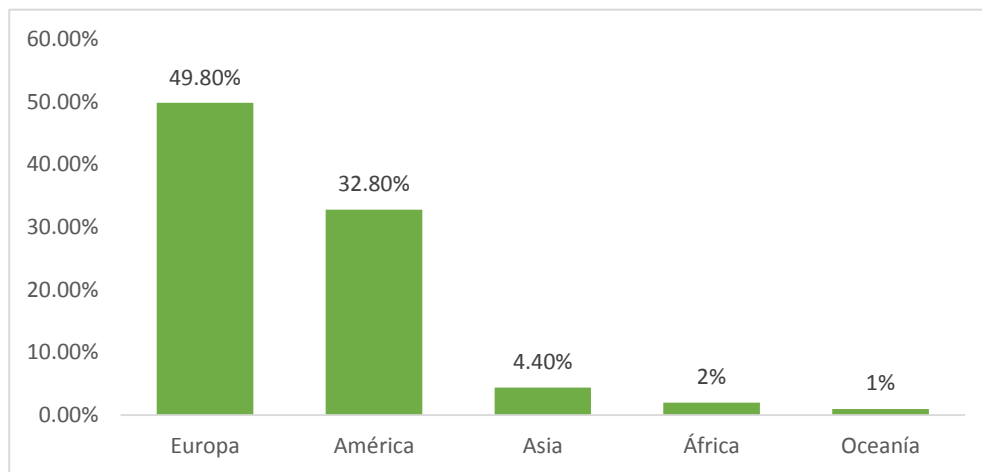


Figura 2-10 Producción de BD por continentes.

Fuente: Infinitas Renovables (2010).

En la Figura 2-11 se detalla la producción, comercio y precios mundiales del BD con proyección hasta el año 2017. En la cual se observa un aumento en la producción de biodiesel a través de los años con un comercio estable al igual que los precios del mismo.

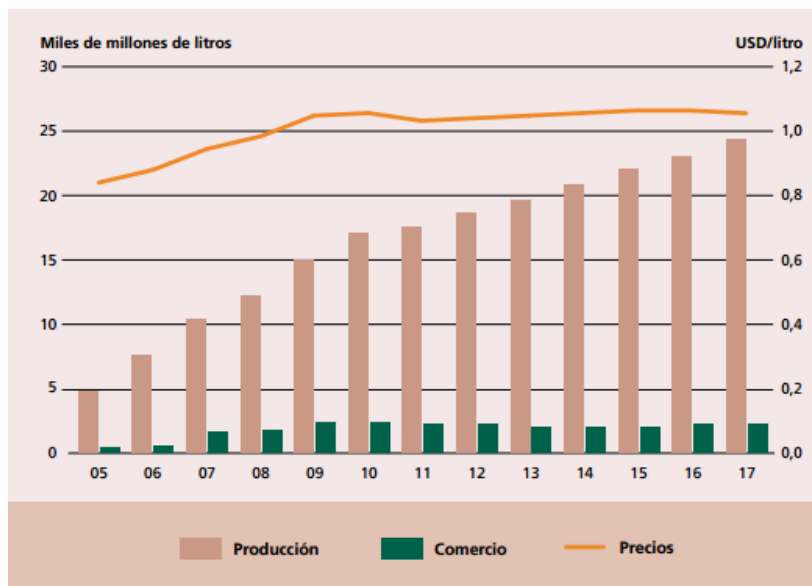


Figura 2-11 Producción, comercio y precios mundiales de biodiesel, con proyecciones hasta 2017.

Fuente: OCDE-FAO (2008).

En la Figura 2-12 se muestra los principales productores de BD con proyecciones hasta el año 2017. Se muestra un dominio de los países pertenecientes a la Unión Europea y un aumento general de la producción de biodiesel.

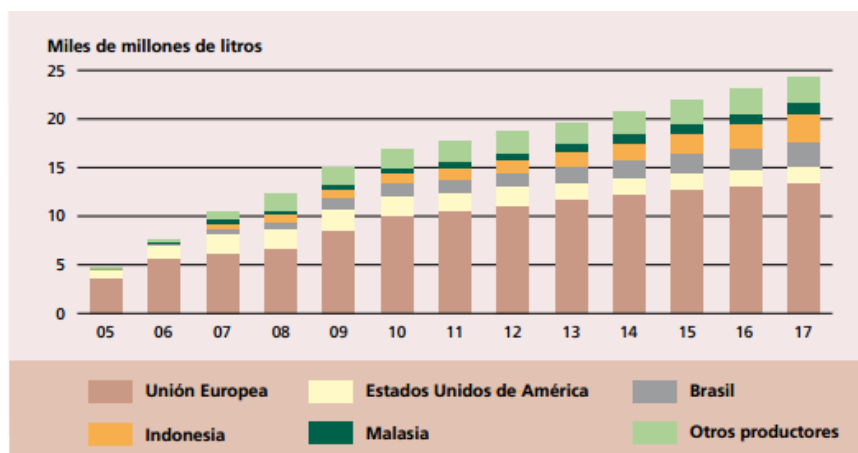


Figura 2-12 Principales productores de biodiesel, con proyecciones hasta 2017.

Fuente: Basado en datos de la OCDE-FAO (2008).

Por otra parte se muestra a continuación un gráfico de la fluctuación de precios del diesel en galones a lo largo del tiempo.

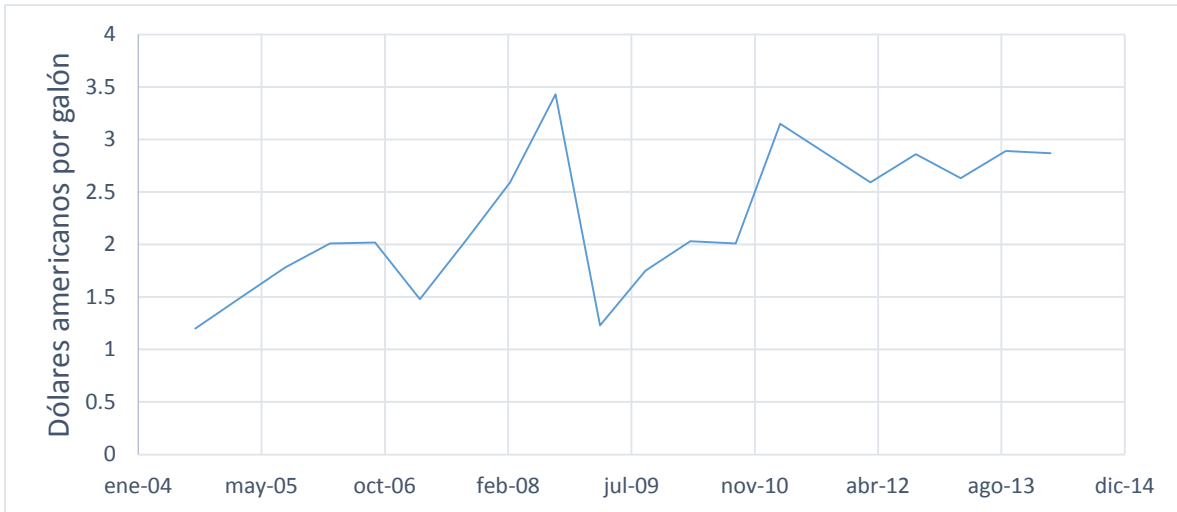


Figura 2-13 Precio de diesel.

Fuente: Índex Mundi 1 (2014)

- **Características del Biodiesel**

El BD cuenta con diferentes características clasificadas desde el punto de vista ambiental, económico y mecánico, las cuales se resumen en la Tabla 2-4, en la que se muestran las ventajas en comparación con su homólogo fósil.

Tabla 2-4 Características del BD

Aspecto	Características
Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Proviene de un recurso renovable. • Es biodegradable. Estudios de evolución de CO₂ (pruebas de biodegradabilidad), llevados a cabo por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA: Environmental Protection Agency), demostraron que el BD puro, tiene un 84.4% de biodegradabilidad, mientras que el aceite diésel presentó un 18.2%. (Cardona, 2006) • Es menos contaminante que el gasoil mineral. • Reduce partículas (smoke) en más de un 50% y las emisiones de CO₂. • Está libre de sulfuro, benceno y aromatizantes potencialmente cancerígenos. • Posee productos derivados del residuo de su proceso como glicerina y fertilizantes orgánicos.

Aspecto	Características
Económicos	<ul style="list-style-type: none"> • La producción de BD tiene importantes incentivos y exenciones fiscales en el ámbito nacional e internacional. • El Protocolo de Kyoto financia la inversión otorgando créditos de carbono a quienes logren reducir las emisiones de CO₂. • Da independencia a la indisponibilidad y variación de precios del diesel fósil. • Es un combustible seguro en su manejo y almacenamiento. • Utiliza las mismas instalaciones que las empleadas para el diesel fósil. • Posibilita su propia producción en ciclo completo (cosecha de oleaginosas – prensado de aceite – producción de biodiesel) reduciendo costos e intermediarios. • La comercialización de sus subproductos (extracto de soja, girasol, etc. como base para alimento balanceado para ganado) constituye un negocio, rentable y permite diversificar riesgos.
Mecánicos	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementa la eficiencia y duplica la durabilidad del motor, mejorando su ignición y lubricidad. • Alto punto de destello aproximadamente 130 °C (Diesel fósil aproximadamente 70 °C). • Posee un importante poder lubricante, por lo que puede ser considerado un aditivo para mejorar la lubricidad. Además, el gasoil sin azufre pierde cualidades lubricantes y para suplir dicha falencia, deben usarse aditivos. • Es importante indicar que motor que funciona con biodiesel, no emana humo negro del escape.

Fuente: Adaptado de Babcock (2006).

2.3.2 Materia Prima

De manera general hablar de biodiesel, es referirse a esteres de alquilo menores (metilo y etilo) de ácidos grasos de cadena par, que en general van del carbono 4 al carbono 24. La razón de esto es la naturaleza de la materia prima utilizada para su producción; es decir, grasas y aceites de origen animal y vegetal. (Martínez Anaya, Ponce Portillo & Reyes Gutiérrez, 2007)

Las materias primas que se pueden emplear en la obtención de BD son muy variadas y pueden clasificarse en (De Blas, et. al., 2003):

- a. Aceites vegetales.
- b. Grasas animales y mezclas.

a) Aceites Vegetales (Martínez et all, 2007)

Los aceites vegetales, son la principal fuente de grasas y aceites utilizados en la preparación de alimentos y en la fabricación de jabón, aceites lubricantes especiales y aceites empleados en productos cosméticos al igual que las grasas animales. Los aceites son extraídos de variedades de semillas y frutos oleaginosos, algunas plantas se cultivan exclusivamente por el aceite que se extrae de sus semillas y frutos de uso alimenticio, mientras que otras constituyen también importantes cultivos industriales, como en los casos del algodón y el lino, que se cultivan para la obtención de fibras textiles. (Martínez et all , 2007)

La recolección de semillas y frutos oleaginosos es una parte importante de la economía agrícola de muchos países. Algunas de las plantas que se cultivan para la obtención de aceite se dan sólo en regiones tropicales (por ejemplo, el cocotero y la palma), otras en regiones mediterráneas (como el olivo), mientras que otras se desarrollan en regiones templadas (maíz, colza, girasol y soja o soya). (Martínez et all, 2007)

La mayoría de los aceites vegetales son ricos en ácidos grasos mono o poliinsaturados, y por ello son considerados ingredientes deseables en la dieta, en sustitución de las grasas animales, más ricas en ácidos grasos saturados, como la mantequilla, la manteca y el sebo. (Martínez et all, 2007)

El aceite se obtiene, en primer lugar, por prensado de las semillas ricas en contenido graso. El aceite que todavía permanece en las semillas tras el proceso de prensado se obtiene por extracción mediante un disolvente orgánico; los

residuos que quedan, ricos en proteínas, son un valioso alimento para el ganado (torta de semillas oleaginosas). Tanto los aceites de presión como de extracción pueden sufrir un proceso posterior de refinado para mejorar sus características organolépticas. La producción de aceite a partir de los frutos es similar. (Martínez et al, 2007)

Los aceites de origen vegetal pueden ser de los siguientes tipos:

- Aceites de semillas oleaginosas: girasol, colza, soja y coco.
- Aceites de semillas oleaginosas alternativas: Brassica carinata, Camelina sativa, Pongamia.
- Aceites de frutos oleaginosos: palma.
- Aceites de semillas oleaginosas modificadas genéticamente: aceite de girasol de alto oleico.
- Aceites vegetales de final de campaña: aceite de oliva de alta acidez.

b) Grasas animales y mezclas

Las grasas de origen animal incluyen la mantequilla, el aceite de pescado, la grasa de pollo, la manteca, el sebo y sus mezclas correspondientes.

Las grasas animales se clasifican en (FEDNA, 2013):

- Grasas poliinsaturadas (origen marino).
- Grasas insaturadas (grasa de aves).
- Grasas moderadamente insaturadas (manteca porcina).
- Grasas saturadas (sebo vacuno).
- Mezclas que se componen de todas las anteriores

2.3.3 Procesos productivos

Para lograr la conversión de los aceites vegetales (nuevos o usados) y grasas animales a metil o etil ésteres existen tres métodos (Zelaya, 2007):

a) Conversión a éster metílico o etílico en medio básico

En este proceso (Figura 2-14) la producción de BD es a partir de aceite vegetal crudo, reacciona a temperaturas moderadas (valor máximo de 65°C) con metanol o etanol en presencia de un catalizador alcalino. Típicamente se utiliza hidróxido de sodio o de potasio. A término de dos horas bajo condiciones de constante agitación, los triglicéridos (moléculas complejas que forman el aceite y que le dan su consistencia viscosa), reaccionan completamente con el metanol para formar cadenas de metil-éster (biodiesel) y glicerina, un producto secundario de valor comercial. (Programa Hemisférico en Agroenergía y Biocombustibles, 2010)

Al emplear el método básico en aceites usados o grasas animales se tendrá una disminución de los metil ésteres por tratarse de aceites no vírgenes, debido a que en estas materias primas existen principalmente una mezcla de triglicéridos, ácidos grasos libres y agua, dando lugar a que una parte de los triglicéridos sea convertida en sales metálicas debido a la reacción de saponificación (jabón) en presencia de agua. Así mismo, los ácidos grasos libres son neutralizados con el catalizador básico, obteniéndose como producto principal una sal metálica (jabón), este mecanismo puede observarse en el sistema reaccionante esbozado en la Figura 2-15. (Zelaya, 2007)

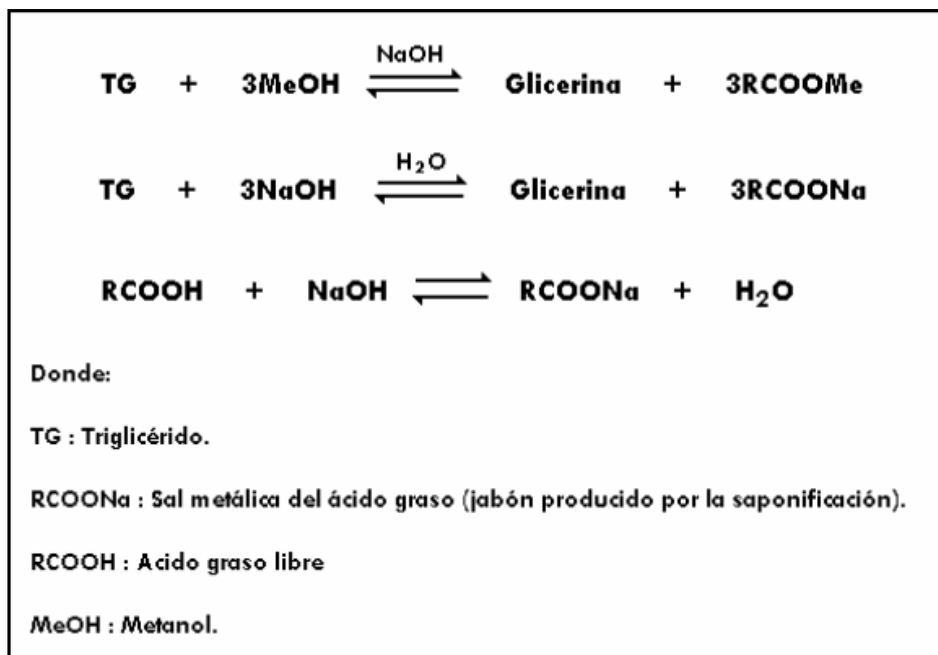


Figura 2-14 Sistema reaccionante para el método básico a partir de aceite usado
Fuente: Zelaya (2007).

Para utilizar este método en aceites y grasas usadas, primeramente debe realizarse la neutralización de los ácidos grasos libres y luego eliminar los jabones remanentes producidos en esta fase, cuando este paso se haya realizado, entonces se realiza la transesterificación. También existe el método básico en dos etapas, esto es para garantizar una mayor conversión; sin embargo, los ácidos grasos libres de los aceites usados constituyen un problema en la reacción, puesto que requieren que el metanol y el catalizador básico se encuentren en exceso; es importante que los reactivos tengan una alta pureza para no disminuir la eficiencia de la reacción. (Zelaya, 2007)

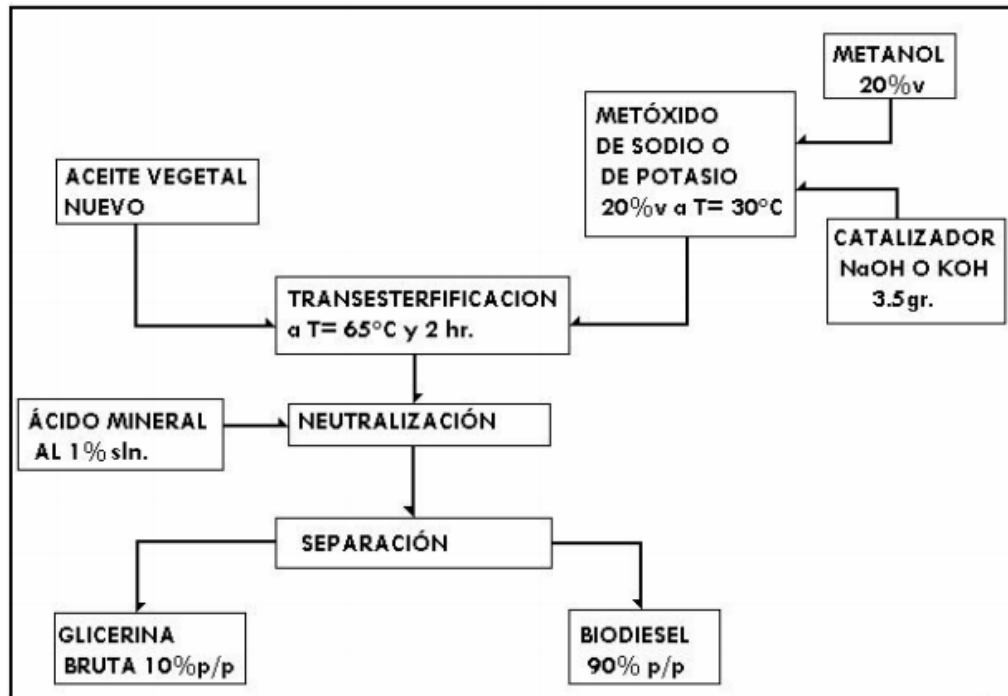


Figura 2-15 Esquema de la producción de BD en un proceso por lotes a partir del aceite vegetal crudo.

Fuente: Zelaya (2007).

Al final de la etapa del proceso tomando como insumo principal el aceite vegetal nuevo se logra lo siguiente (Zelaya, 2007):

- Elevada conversión (98%) con pocas reacciones secundarias y reducido tiempo de reacción.
- Conversión directa a éster metílico sin pasos intermedios.
- Materiales de construcción estándar.
- 90%p/p de BD y 10%p/p de glicerina bruta. (Zelaya, 2007)

b) Conversión de éster metílico en medio ácido

En este método el proceso es similar que en la transesterificación en medio básico, sin embargo, no es muy común el utilizarlo en la producción, ya que su proceso es muy lento por depender del equilibrio químico el cual no está necesariamente desplazado hacia los productos, pero se da la circunstancia de que los productos, glicerina (o glicerol) y biodiesel (o éster metílico), son

inmiscibles, lo que propicia que se separen de forma espontánea forzando a que la reacción continúe desplazándose hacia la síntesis de productos y consecuentemente aumenta el gasto del alcohol, provocando que el precio del BD aumente significativamente.

c) Conversión de éster metílico en dos etapas: proceso ácido- base

Este método es una combinación de los dos anteriores, ya que proporciona mayor eficiencia en la conversión del BD en materiales de elevada acidez. (Fuentes & Paredes Acevedo, 2011)

- **Primera etapa:** FASE ÁCIDA, empleándose normalmente ácido sulfúrico como catalizador, el cual convierte los ácidos grasos libres a ésteres; en esta etapa se da la esterificación, evitando que los ácidos grasos se combinen con el metal del hidróxido que induce a la formación de jabón y ocasione problemas con la reacción, este proceso también puede utilizarse en grasas y aceites crudos, y el proceso no se modifica.
- **Segunda etapa:** FASE ALCALINA, produciéndose la transesterificación tal y como se describe en el método básico, la transesterificación ácida puede darse; sin embargo, se requiere de alcohol en exceso para esterificar todos los ácidos grasos libres y debido a que la reacción es muy lenta (depende del equilibrio), el costo de producción aumentaría significativamente; sin embargo, este proceso ayuda a disminuir el requerimiento de hidróxido.

En la etapa básica es necesario neutralizar el catalizador ácido, y luego se da marcha a la transesterificación, las moléculas de agua se mezclan con el ácido sulfúrico, formando sales sulfatadas de sodio solubles en agua, lo que favorece que el metal no intervenga en la reacción (Kac, 2005). En la Figura 2-16 se resume esta etapa. (Larosa, 2001)

La ventaja principal que posee el método ácido-base, empleado en aceites usados y grasas animales, es que logra evitar o al menos disminuir la reacción de

saponificación, debido a que en la etapa ácida, los ácidos grasos se transforman en metilésteres debido a la reacción de esterificación; en la etapa básica se da la transesterificación de los triglicéridos, el sistema reaccionante se esquematiza en la Figura 2-17. (Fuentes & Paredes Acevedo, 2011)

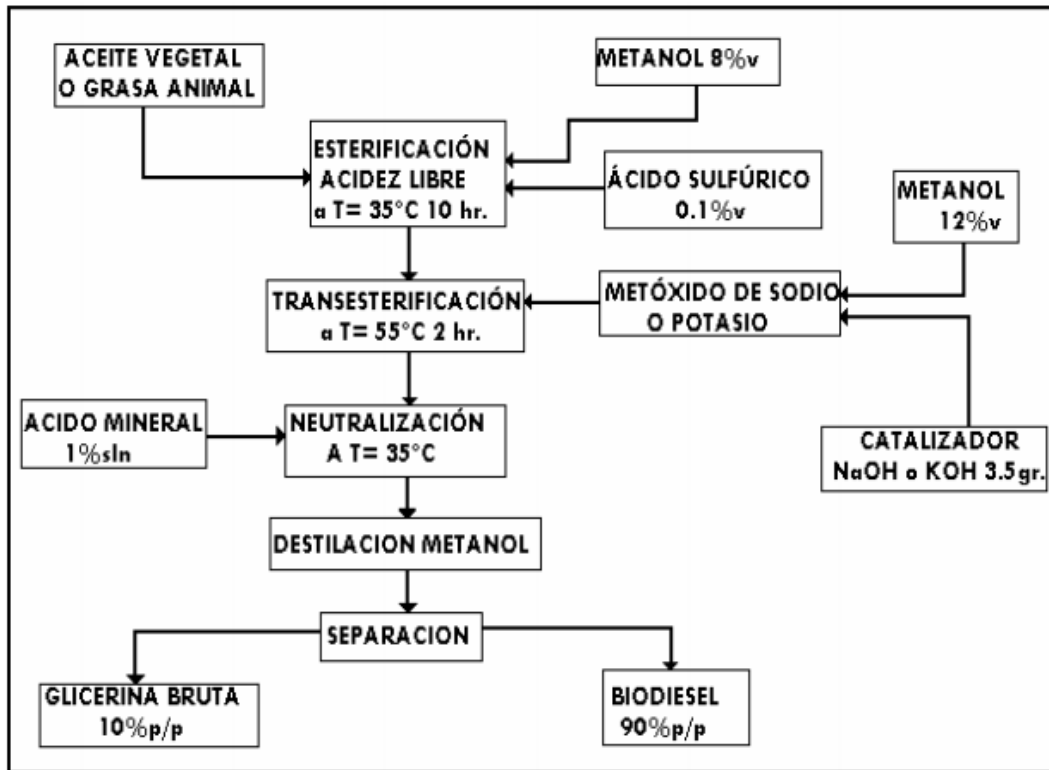


Figura 2-16 Diagrama de flujo de proceso de fabricación de biodiesel.

Fuente: Zelaya (2007).

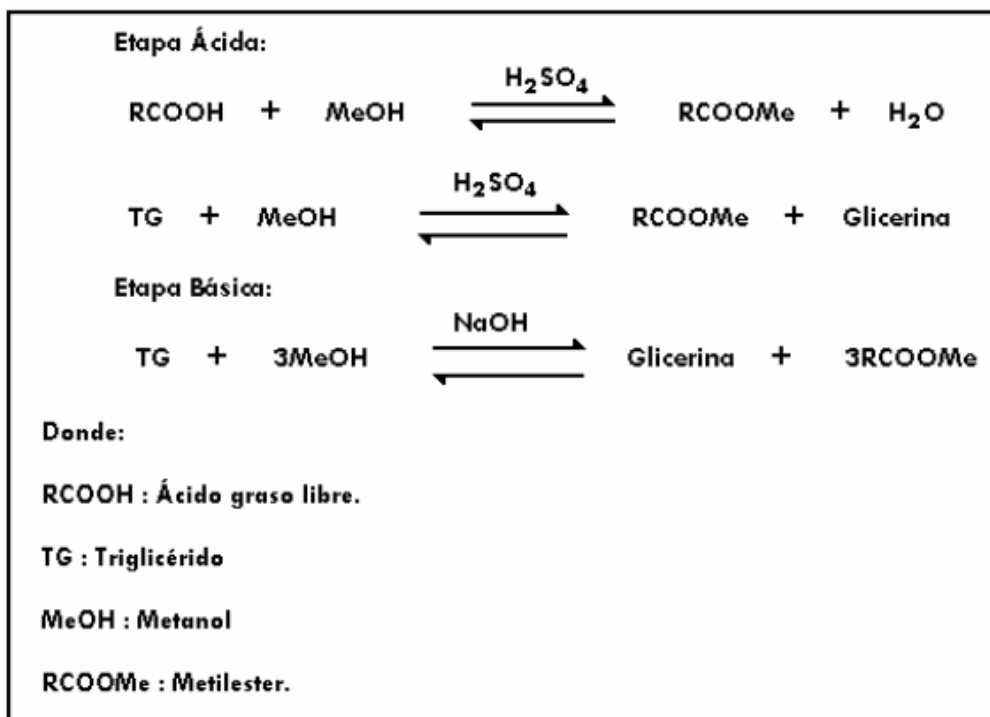


Figura 2-17 Sistema reaccionante para el método ácido-base, a partir de aceite usado.

Fuente: Zelaya (2007).

Estas son las tres formas en las cuales puede llevarse a cabo la conversión de un material graso a biodiesel mediante transesterificación, estos procesos pueden combinarse en procesos continuo o discontinuo, lo que permite una variedad de distribuciones en el diseño y construcción de una planta productora de biodiesel. (Zelaya, 2007)

2.3.4 Producción en El Salvador

En El Salvador a inicios del año 2006 arrancó el funcionamiento de la planta piloto productora de BD a partir de higuierillo. Esta planta posee una capacidad aproximada de 3000 litros/ mes, por otra parte se llevó a cabo una etapa de investigación de cultivo de tempate para producción de biodiesel, apoyada por la empresa petrolera inglesa D1OIL y el Ministerio de Agricultura y Ganadería. (Zelaya, 2007)

En abril de 2007 en El Salvador se inauguró la primera planta industrial de biodiesel, con una capacidad máxima de 25,000 galones/día de BD de aceite de palma africana, localizada en Ciudad Arce en el departamento de La Libertad. (Zelaya, 2007)

A inicios del año 2008 en un esfuerzo en conjunto de los gobiernos de Colombia y El Salvador, por medio del homólogo CENTA - CORPOICA, se recibió la donación de una planta piloto de BD y el módulo de extracción de aceites vegetales. La planta piloto de biodiesel, inició funciones con pruebas piloto iniciales con el fin de afinar el proceso productivo. Toda la producción de BD se utilizó en la flotilla de vehículos y maquinaria de CENTA. (Castro, 2008)

En la Tabla 2-5 se enumeran las empresas que producían BD en El Salvador en el 2008:

Tabla 2-5 Empresas involucradas en la producción de BD en El Salvador

Productor de biodiesel	Ubicación	Materia prima utilizada	Capacidad instalada de producción estimada (Ton/año)	Producción estimada (litros/mes)	Situación actual
Guibar	Sonsonate	Aceites usados y/o grasas animales	160	15160	Produciendo con materias primas mencionadas
Sun Energy	Santa Ana	Aceites usados y/o grasas animales	80	7580	Produciendo con materias primas mencionadas
Inversiones Andrómeda	San Salvador	Aceites usados y/o grasas animales	80	7580	Produciendo con materias primas mencionadas
QUINDECA	San Salvador	Aceites usados y/o grasas	40	3790	Produciendo con materias primas

Productor de biodiesel	Ubicación	Materia prima utilizada	Capacidad instalada de producción estimada (Ton/año)	Producción estimada (litros/mes)	Situación actual
		animales			mencionadas
ADEL Morazán	Morazán	Aceites vírgenes de higuerrillo y/o tempate (jatropha)	633.5	60000	No están produciendo. Están a la espera de las materias primas mencionadas
Sociedad Industrial de Aceite de Ricino	San Miguel	Aceites vírgenes de higuerrillo y/o tempate (jatropha)	64	6064	No están produciendo.
ANTRA-PETT	La Libertad	Aceites vírgenes de higuerrillo y/o tempate (jatropha)	Dato no disponible	Dato no disponible	No están produciendo. Están a la espera de las materias primas mencionadas
Bioenergía	Sonsonate	Aceite de palma	4800	454800	No están produciendo.

Fuente: Sun Energy Corp. El Salvador (2008).

2.3.5 Panorama de producción y uso en El Salvador

Actualmente la producción de BD no es intensiva ya que la mayoría de entes productores solo realizan ensayos a nivel de investigación con el fin de conocer

mejor los rendimientos de producción, así como el consumo de catalizador, sólidos de lavado, agua, etc. dependiendo de la materia prima utilizada. (Castro, 2008)

El CENTA para inicios del 2014 se encontraba produciendo BD a partir de maní debido a que el proyecto del gobierno nominado SITRAMS utilizaría en su flota vehicular una mezcla B10, pero debido a los retrasos que este proyecto ha tenido dicha producción se ha frenado. (Castro, 2008)

2.4 MARCO LEGAL Y REGULATORIO DEL SECTOR ENERGÉTICO EN EL SALVADOR

La política energética de El Salvador responde a los enunciados del Plan Quinquenal de Desarrollo (PQD) 2010-2014, emitido por el gobierno de El Salvador que establece que la política nacional de energía tiene una importancia estratégica para el desarrollo del país. (Gobierno de El Salvador, 2010)

En El Salvador, a diferencia de otros países centroamericanos, el tema energético no se aborda directamente en la Constitución Política de la República. Una de las leyes más antigua que data de agosto de 1948, fue la ley de la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa. Dicha Ley aprueba la creación de la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL), con el objetivo de desarrollar, conservar, administrar y utilizar los recursos energéticos y fuentes de energía de El Salvador (Decreto N°137).

El marco legal del sector energético está compuesto por ocho piezas legislativas, la más reciente e importante para el sector energético es la Ley de Creación del Consejo Nacional de Energía (CNE), además cuatro de estas leyes corresponden al subsector electricidad y tres al subsector hidrocarburos y combustibles. (Cordero, 2011)

Por su parte, integran el marco legal del subsector hidrocarburos y combustibles las leyes siguientes:

- Ley Reguladora del Depósito, Transporte y Distribución de Productos de Petróleo, Decreto Legislativo 169-70 y sus reformas.
- Ley de Hidrocarburos, Decreto Ley 626-1981, cuyo objeto es regular el fomento, desarrollo y control de la exploración y explotación de yacimientos de hidrocarburos, así como su transporte por ductos.
- Ley del Gas Natural, Decreto Legislativo 630-2008, cuyo objeto es normar y regular la recepción, almacenaje, regasificado, transporte, distribución y comercialización del gas natural.

Como legislación general se destacan la Ley de Competencia, la Ley de Protección del Consumidor y la Ley del Medio Ambiente que, respectivamente, protegen la competencia, la relación de consumo y el medio ambiente. En la Tabla 2-6 se muestra un resumen de un estudio realizado por el Ministerio de Economía (MINEC) donde analiza las instituciones involucradas en este tema, descomponiéndolo por aspectos claves tales como energías renovables y eficiencia energética entre otros.

Tabla 2-6 Estudios de energías renovables y eficiencia energética realizados por el MINEC

	CNE	SIGET	DHyM	MINEC	CEL	FINET
Energías Renovables	Formula política y coordina su implementación	Aplica política en aspectos regulatorios (subsector eléctrico)	No tiene competencias	No tiene competencias	Aplica política desarrollando proyectos de inversión	No explícitamente coopera aplicando políticas a programas de subsidios
Eficiencia Energética	Formula política y coordina su implementación	Aplica política en aspectos regulatorios (subsector eléctrico)	Aplica política en aspectos regulatorios (subsector hidrocarburos y gas natural)	Formulación e implementación de políticas. Normas comerciales y etiquetado	Aplica política si se le requiere como agente estatal	No explícitamente coopera aplicando políticas a programas de subsidios
Electrificación Rural	Formula política y coordina su implementación	Aplica política en aspectos regulatorios (subsector eléctrico)	No tiene competencias	Formulación e implementación de políticas	Aplica política si se le requiere como agente estatal	Aplica políticas gestiona programas y administra subsidios
Subsidios	Formula política y coordina su implementación	Aplica política en aspectos regulatorios (subsector eléctrico)	Controla aplicación subsidio GLP	Determina subsidio GLP para consumo doméstico	Aplica política si se lo requiere como agente estatal	Aplica políticas gestiona programas y administra subsidios

	CNE	SIGET	DHyM	MINEC	CEL	FINET
Mercado Eléctrico	Formula política y coordina su implementación	Concentra todas las funciones regulatorias	No tiene competencias	No tiene competencias	Función empresaria	No tiene competencias
Gas Natural	Formula política y coordina su implementación	No tiene competencias coordinación regulatoria futura con el mercado eléctrico	Comparte funciones regulatorias con el MINEC	Comparte funciones regulatorias con la DHyM	No tiene competencias	No tiene competencias
Hidrocarburos Upstream	Formula política y coordina su implementación	No tiene competencias	No tiene competencias	Funciones políticas y regulatorias	Funciones políticas, regulatorias y empresarias	No tiene competencias
Hidrocarburos Downstream	Formula política y coordina su implementación	No tiene competencias	Comparte funciones regulatorias con el MINEC	Comparte funciones regulatorias con la DHyM	No tiene competencias	No tiene competencias
Biocombustibles	Formula política y coordina su implementación	No tiene competencias	No tiene competencias	No tiene competencias	No tiene competencias	No tiene competencias

Fuente: MINEC (2009) b.

2.4.1 Subsector hidrocarburos y combustibles

Este subsector ha atravesado un proceso de desregulación, en el que se puede observar que hasta 1992, los precios y márgenes de distribución mayorista y minorista se encontraban regulados. En 1992 se eliminaron los precios máximos, reemplazándose por precios pactados. (Cordero Pinchansky, 2011)

En enero de 1994 se estableció el Sistema de Precios de Paridad de Importación (PPI) que establecía precios máximos de facturación del importador y refinador local, respecto a las restantes compañías petroleras. Sólo se mantuvo fijado el precio al público del diesel para los autobuses urbanos y del gas licuado a presión de consumo doméstico, productos que contaban con subsidios financiados con impuestos a las gasolinas. En noviembre de 2001, se eliminó el subsidio al diesel y el impuesto en las gasolinas. A partir de enero de 2002, los precios quedan totalmente liberados para todos los canales de comercialización, con excepción únicamente del gas licuado de petróleo para consumo doméstico, en presentaciones de 35, 25, 20 y 10 libras. Finalmente, en enero de 2006, se eliminaron las restricciones geográficas para la instalación de estaciones de servicio que se encontraban establecidas en la ley sectorial. (Cordero Pinchansky, 2011)

La Ley Reguladora del Depósito, Transporte y Distribución de Productos de Petróleo (LRDTPDP), decreto legislativo 169-70 y sus reformas, establece los requisitos para construir y operar las facilidades de almacenamiento y estaciones de servicio y la porción correspondiente de las Normas Salvadoreñas Obligatorias (NSO) que establecen la calidad de los productos en general, incluyendo los combustibles. De manera resumida, se puede decir que la Ley Reguladora del Depósito, Transporte y Distribución de Productos de Petróleo (LRDTPDP) es la que regula la cadena de comercialización de los productos de petróleo, desde su etapa de importación, refinación y transformación a su transporte y distribución mayorista y minorista. Se trata de una ley originaria de 1970, que ha sufrido

importantes modificaciones y sustituciones a lo largo de su historia, incluidas tres reformas en el año 2008, lo que de acuerdo con el MINEC ha resultado en un texto poco articulado y claro. (MINEC, 2009a)

El fomento, desarrollo y control de las fases de exploración y explotación de yacimientos de hidrocarburos y su transporte por ductos son reguladas por la Ley de Hidrocarburos, Decreto Ley 626-1981, complementaria de la Ley Reguladora, sancionada en 1981. (MINEC, 2009a)

2.4.2 Biocombustibles

En el año 2005 se introdujo el Plan Nacional para la producción de BE con el objeto de reducir la independencia de importaciones de combustibles fósiles. La meta propuesta por el gobierno es una mezcla que contenga un 10% de BE para lo cual establece exenciones de impuestos. En relación al biodiesel, el proyecto se encuentra en la fase de estudios técnicos y de factibilidad económica por parte del gobierno. (Duffey, 2011)

2.5 POLITICA ENERGÉTICA DE EL SALVADOR

Dentro de estos pilares se han considerado los siguientes en base a la situación actual de El Salvador:

- a. Económica:** Se debe alcanzar una mayor eficiencia en la producción y uso de la energía, mayor cantidad de servicios por unidad de energía consumida.
- b. Social:** Se debe lograr una mayor cobertura de los requerimientos básicos de energía esenciales para el logro de una mayor equidad social.
- c. Ambiental:** Se deben explotar los recursos naturales energéticos de forma racional.

- d. **Política:** Se debe buscar una afirmación de seguridad energética y reducción de vulnerabilidad en el marco de promoción de la participación y el respeto de la voluntad ciudadana.

2.5.1 Objetivos de la política energética

La política presenta cuatro grandes objetivos generales que se analizan a continuación.

Objetivo 1: Garantizar un abastecimiento de energía oportuno, continuo, de calidad, generalizado y a precios razonables a toda la población.

Objetivo 2: Recuperar el papel del Estado en el desarrollo del sector energético, fortaleciendo el marco institucional y legal que promueva, oriente y regule el desarrollo del mismo, superando los vacíos y debilidades existentes que impiden la protección legal de las personas usuarias de estos servicios.

Objetivo 3: Reducir la dependencia energética del petróleo y sus productos derivados, fomentando las fuentes de energía renovables, la cultura de uso racional de la energía y la innovación tecnológica.

Objetivo 4: Minimizar los impactos ambientales y sociales de los proyectos energéticos, así como aquellos que propician el cambio climático.

2.5.2 Beneficios ambientales potenciales que involucra la política energética

- a. Reducción de CO₂ y otros contaminantes atmosféricos si se reducen los combustibles fósiles.
- b. Reduce presión/dependencia de una sola fuente.
- c. Disminuye la huella ecológica si se reduce consumo de combustibles fósiles.
- d. Reducción de efectos sobre la salud humana.

- e. Reducción de efectos sobre la salud de los ecosistemas.
- f. Mejora de salud humana si se evitan emisiones locales como las causadas por la leña.
- g. Nuevos diseños pueden ser ecoeficientes.
- h. Posible mejora en la calidad de vida.
- i. Reducción del uso de materiales con efectos tóxicos.
- j. Reducción de desechos y descargas de efluentes.
- k. Opción de formar nuevas actividades productivas.
- l. Riesgos Ambientales Potenciales que Considera la Política Energética.

Todo uso de las fuentes de energía, aun de las renovables, involucra frecuentemente efectos ambientales que deben ser identificados siempre que sea posible.

2.5.3 Estrategia de biocombustibles

Durante las próximas décadas, se estima que los combustibles fósiles líquidos continuarán siendo el eje de la energía en el sector transporte, lo cual genera una fuerte dependencia de proveedores externos. De este modo, un sector esencial del país está expuesto a la volatilidad y eventual aumento del precio del petróleo y de sus derivados. Adicionalmente, la utilización de combustibles fósiles en el transporte tiene importantes impactos ambientales tanto a nivel local como global.

Los biocombustibles representan una alternativa a los combustibles fósiles líquidos, esencialmente para el parque vehicular, aunque también puedan tener aplicaciones en ciertas áreas industriales. La introducción de BE en lugar de gasolina y de BD en lugar de petróleo diesel, permitiría reducir las emisiones negativas al ambiente (sobre todo material particulado y dióxido de carbono), bajar la dependencia externa, ya que se cuenta con producción local, y reducir la exposición a la volatilidad de precios, además de abrir la posibilidad de menores

precios. Se debe tener especial cuidado de no crear conflictos en el uso del suelo que afecten la seguridad alimentaria.

El Salvador está en una etapa incipiente en la introducción de este tipo de combustibles por lo que se requiere de más tiempo para su efectiva implementación.

2.5.4 Plan de acción para el desarrollo de la estrategia de biocombustibles

Este proyecto surgió de la iniciativa del Gobierno de El Salvador, con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), como una alternativa para enfrentar la crisis energética producto del alza en los combustibles de origen fósil.

El objetivo de este programa es elaborar los estudios técnicos, financieros, ambientales y sociales para facilitar la toma de decisiones respecto a la definición y puesta en marcha de dicho programa en El Salvador y apoyar otras actividades encaminadas a implementar en el corto plazo.

Dentro de los componentes que sustentan este desarrollo estratégico de biocombustibles se mencionan:

Componente I: Investigación, validación, desarrollo agrícola y agroindustrial de cultivos bioenergéticos. Ejecutado por CENTA.

Componente II: Legislación, aspectos regulatorios y eficiencia energética. Ejecutado por el Ministerios de Economía.

El seguimiento del plan de acción para el desarrollo de la estrategia de biocombustibles toma en cuenta las siguientes consideraciones:

a. Socioeconómicos

b. Ambientales

Dentro de los retos bioenergéticos que presenta El Salvador para desarrollar una estrategia de biocombustibles son:

- Fomentar la producción, comercialización y consumo de biocombustibles.
- Diversificar la matriz Energética (EERR).
- Reducir la vulnerabilidad a condiciones externas fortalecer y diversificar la agricultura.
- Disminuir los efectos dañinos de las emisiones de GEI.
- Crear la legislación de biocombustibles en el país (MINEC).
- Crear el mercado mezcla de biocombustibles líquidos con los combustibles fósiles.
- Financiamiento y facilitar el establecimiento de convenios de compra de biocombustibles líquidos.

Capítulo 3 MEDICIÓN DE SOSTENIBILIDAD

A partir del informe Brundtland, el mundo es concebido como un sistema global cuyas partes están interrelacionadas considerándose el concepto de desarrollo sostenible como un proceso multidimensional que afecta al sistema económico, ecológico y social, pasando a ser una variable a tener en cuenta en las decisiones de política económica. (Duran, 2013)

Sin embargo, en los últimos años, una de las cuestiones más preocupantes ha sido el conocer si realmente se siguen pautas de sustentabilidad, es decir, si se tienen indicadores que nos alerten sobre la evolución positiva o negativa de este proceso. Aunque la ambigüedad del propio concepto dificulta esta tarea, se han ido elaborando algunos indicadores que muestran aspectos de las tres dimensiones mencionadas anteriormente. (Duran, 2013)

3.1 CONCEPTO DE SOSTENIBILIDAD Y SU EVOLUCIÓN

El origen del concepto se sitúa a principios de la década de los años 80, a partir de perspectivas científicas sobre la relación entre el medioambiente y la sociedad y la publicación de varios documentos relevantes, principalmente la *Estrategia Mundial para la Conservación* (World Conservation Strategy, UICN, 1980, primera estrategia global de desarrollo sostenible) y el conocido como *Informe Brundtland*. (OEI, 2010)

Surge como resultado de los análisis de la situación del mundo, que puede describirse como una emergencia, como una situación insostenible, fruto de las actividades humanas, que amenaza gravemente el futuro de la misma humanidad. Se habla incluso de una etapa geológica nueva, el antropoceno, término propuesto por el premio Nobel Paul Crutzen para destacar la responsabilidad de la especie humana en los profundos cambios que está sufriendo el planeta. (OEI, 2010)

Los términos desarrollo sostenible, perdurable, o sustentable, se aplican y se colocan al desarrollo socioeconómico, y su definición se formalizó por primera vez en el documento conocido como Informe Brundtland (1987), fruto de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas, creada en Asamblea de las Naciones Unidas en 1983. Dicha definición se asumió en el Principio 3º de la Declaración de Río (1992). (OIE, 2010)

Es a partir de este informe cuando se acotó el término inglés sustainable development (desarrollo sostenible). A partir de la década de 1970, los científicos empezaron a darse cuenta de que muchas de sus acciones producían un gran impacto sobre la naturaleza, por lo que algunos especialistas señalaron la evidente pérdida de la biodiversidad y elaboraron teorías para explicar la vulnerabilidad de los sistemas naturales. (OIE, 2010)

El Informe Brundtland brinda la siguiente definición de desarrollo sostenible:

"Es el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades." (ONU, 1987)

El ámbito del desarrollo sostenible puede dividirse conceptualmente en tres partes (OIE, 2010):

- a. Ecológico.**
- b. Económico.**
- c. Social.**

Se considera el aspecto social por la relación entre el bienestar social con el medio ambiente y la bonanza económica. El triple resultado de la división del desarrollo sostenible es un conjunto de indicadores de desempeño en las tres áreas, pero que tiene cuatro dimensiones básicas (OIE, 2010):

- Conservación.
- Desarrollo (apropiado) que no afecte sustantivamente los ecosistemas.
- Paz, igualdad, y respeto hacia los derechos humanos.
- Democracia.

El desarrollo sostenible o sustentable es un concepto desarrollado hacia el fin del siglo XX. Es una alternativa de reestructuración del concepto de desarrollo en el cual se permite el crecimiento económico y el uso de los recursos naturales a nivel mundial, pero teniendo muy en cuenta los aspectos medioambientales y sociales globales, para que en el largo plazo no se comprometa ni se degrade sustantivamente ni la vida en el planeta, ni la calidad de vida de la especie humana. (Bateo, 2014)

3.2 DIFERENTES ENFOQUES DE SOSTENIBILIDAD

La definición del Informe Brundtland, hasta ahora la más conocida, ha sido la más difundida y es la que sirve de argumento para toda una serie de ideas y teorías que se han generado sobre desarrollo sostenible. Las definiciones que proliferan por lo general excluyen ciertas partes de la totalidad conceptual de la cual son una unidad integral. (OIE, 2010)

En el Tabla 3-1 se muestra un resumen de las perspectivas teóricas que han sido utilizadas para caracterizar el desarrollo sostenible. Es importante reconocer que el desarrollo sostenible puede ser tratado a la vez como modelo y como punto de legitimación. En consecuencia, en el campo de la ciencia y la política, la expresión desarrollo sostenible a menudo se utiliza para fines diferentes. En último análisis, ningún grupo por sí mismo tiene la autoridad para definir el desarrollo sostenible, por lo que el concepto está lleno de ambigüedad. Este carácter ambiguo ilustra el racionalismo que le es inherente. (CEPAL, 2003)

Tabla 3-1 Caracterización de desarrollo sostenible según teorías

Teoría	Caracterización del desarrollo sostenible
Neoclásica-equilibrio	Bienestar no decreciente (antropocéntrico); crecimiento sostenible basado en tecnología y sustitución; optimiza las externalidades ambientales; mantiene el acervo agregado de capital natural y económico; los objetivos individuales prevalecen sobre las metas sociales; la política se aplica cuando los objetivos individuales entran en conflicto; la política de largo plazo se basa en soluciones de mercado.
Neoaustríaca-temporal	Secuencia teleológica de adaptación consciente y orientada al logro de las metas; previene los patrones irreversibles; mantiene el nivel de organización (negentropía) del sistema económico; optimiza los procesos dinámicos de extracción, producción, consumo, reciclaje y tratamiento de desechos.
Ecológico-evolutiva	Mantiene la resiliencia de los sistemas naturales, contemplando márgenes para fluctuaciones y ciclos (destrucción periódica); aprende de la incertidumbre de los procesos naturales; no dominio de las cadenas alimentarias por los seres humanos; fomento de la diversidad genética/biótica/ecosistémica; flujo equilibrado de

Teoría	Caracterización del desarrollo sostenible
	nutrientes en los ecosistemas.
Físico-económica	Restringe los flujos de materiales y energía hacia y desde la economía; metabolismo industrial basado en política de cadenas materiales producto: integración de tratamiento de desechos, mitigación, reciclado, y desarrollo de productos.
Biofísico-energética	Estado estacionario con transflujo de materiales y energía mínimo; mantiene el acervo físico y biológico y la biodiversidad; transición a sistemas energéticos que producen un mínimo de efectos contaminantes.
Sistémico-ecológica	Control de los efectos humanos directos e indirectos sobre los ecosistemas; equilibrio entre los insumos y productos materiales de los sistemas humanos; minimización de los factores de perturbación de los ecosistemas, tanto locales como globales.
Ingeniería ecológica	Integración de las ventajas humanas y de la calidad y funciones ambientales mediante el manejo de los ecosistemas; diseño y mejoramiento de las soluciones ingenieriles en la frontera entre la economía, la tecnología y los ecosistemas; aprovechamiento de la resiliencia, la auto-organización, la autorregulación y las funciones de los sistemas naturales para fines humanos.
Ecología humana	Permanencia dentro de la capacidad de carga (crecimiento logístico); escala limitada de la economía y la población; consumo orientado a la satisfacción de las necesidades básicas; ocupación de un lugar modesto en la red alimentaria del ecosistema y la biosfera; tiene siempre en cuenta los efectos multiplicadores de la acción humana en el tiempo y el espacio.
Socio- biológica	Conservación del sistema cultural y social de interacciones con los ecosistemas; respeto por la naturaleza integrado en la cultura; importancia de la supervivencia del grupo
Histórico-institucional	Igual atención a los intereses de la naturaleza, los sectores y las generaciones futuras; integración de los arreglos institucionales en las políticas económicas y ambientales; creación de apoyo institucional de largo plazo a los intereses de la naturaleza; soluciones holísticas y no parciales, basadas en una jerarquía de valores.
Ético- utópica	Nuevos sistemas individuales de valor (respeto por la naturaleza y las generaciones futuras, satisfacción de las necesidades básicas) y nuevos objetivos sociales (estado estacionario); atención equilibrada a la eficiencia, distribución y escala; fomento de actividades en pequeña escala y control de los efectos secundarios ("lo pequeño es hermoso"); política de largo plazo basada en

Teoría	Caracterización del desarrollo sostenible
	valores cambiantes y estimulante del comportamiento ciudadano (altruista) en contraposición al comportamiento individualista (egoísta).

Fuente: CEPAL (2003).

El objetivo del desarrollo sostenible es definir proyectos viables y reconciliar los aspectos económico, social, y ambiental de las actividades humanas; "tres pilares" que deben tenerse en cuenta por parte de las comunidades, tanto empresas como personas (OIE, 2010):

3.2.1 Sostenibilidad social

Se basa en el mantenimiento de la cohesión social y de su habilidad para trabajar en la persecución de objetivos comunes. Tomando el ejemplo de una empresa, es tener en cuenta las consecuencias sociales de la actividad de la misma en todos los niveles: los trabajadores (condiciones de trabajo, nivel salarial, etc.), los proveedores, los clientes, las comunidades locales y la sociedad en general. (Bateo, 2014)

Se considera alcanzada la sustentabilidad social cuando los costes y beneficios son distribuidos de manera adecuada tanto entre el total de la población actual (equidad intergeneracional) como entre las generaciones presentes y futuras (equidad intergeneracional). Desde un punto de vista social, los agentes sociales y las instituciones desempeñan un papel muy importante en el logro del desarrollo sostenible a través de una correcta organización social, que permita el desarrollo duradero y de las técnicas adecuadas como son las inversiones en capital humano o, por ejemplo, el incremento de la cohesión social. (OIE, 2010)

3.2.2 Sostenibilidad ambiental

Es la compatibilidad entre la actividad considerada y la preservación de la biodiversidad y de los ecosistemas, evitando la degradación de las funciones

fuentes y sumideros. Incluye un análisis de los impactos derivados de la actividad considerada en términos de flujos, consumo de recursos difícil o lentamente renovables, así como en términos de generación de residuos y emisiones. Esta sostenibilidad es necesaria para que la sostenibilidad económica y social sean estables. (Bateo, 2014)

El argumento es que el planeta es el ecosistema global, fuente de los recursos necesarios para la sociedad y al mismo tiempo vertedero de todos los residuos originados por la actividad económica. Como el planeta es finito, el ecosistema global tiene obviamente límites tanto en cuanto a fuente de recursos y capacidad regenerativa, como en capacidad de asimilación. Como el sistema económico ha evolucionado exponencialmente, es en la actualidad demasiado grande en relación al ecosistema global. (OIE, 2010)

Los límites de los recursos naturales sugieren tres reglas básicas en relación con los ritmos de desarrollo sostenibles (Bateo, 2014):

1. Ningún recurso renovable deberá utilizarse a un ritmo superior al de su generación.
2. Ningún contaminante deberá producirse a un ritmo superior al que pueda ser reciclado, neutralizado o absorbido por el medio ambiente.
3. Ningún recurso no renovable deberá aprovecharse a mayor velocidad de la necesaria para sustituirlo por un recurso renovable utilizado de manera sostenible.

Se llama desarrollo sostenible a aquel desarrollo que es capaz de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos y posibilidades de las futuras generaciones. Una actividad sostenible es aquella que se puede mantener. (Bateo, 2014)

3.2.3 Sostenibilidad económica

Se da cuando la actividad que se mueve hacia la sostenibilidad ambiental y social es financieramente posible y rentable. (Bateo, 2014)

Promueve un uso inteligente de los recursos económicos en busca, no sólo de ahorrar sino de conseguir que el valor de la intervención sea mucho mayor que su precio. (OIE, 2010)

Se argumenta en el informe Bruntland que dice lo siguiente:

Vemos la posibilidad de una nueva era de crecimiento económico que ha de fundarse en políticas que sostengan y amplíen la base de recursos del medio ambiente; y creemos que ese crecimiento es absolutamente indispensable para aliviar la gran pobreza que sigue acentuándose en buena parte del mundo en desarrollo. (ONU, 1987)

En la Figura 3-1 Se presentan un diagrama de Venn de círculos no concéntricos que muestran como tanto el dominio de lo social como el de lo económico son creaciones humanas, y dependientes del medio ambiente. Es lo que Maureen Hart afirma se trata de -una visión mejor de la comunidad sostenible. (López, 2012)

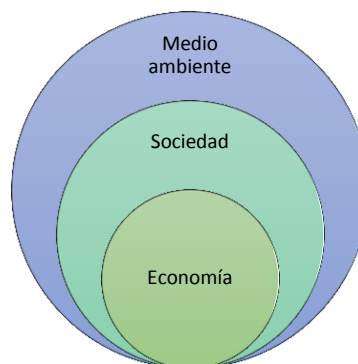


Figura 3-1 Diagrama de Venn.

Fuente: López (2012)

La economía ecológica asume como concepto clave el de la resiliencia, que se refiere a la mayor o menor vulnerabilidad de los ecosistemas así como a sus situaciones críticas y su traducción a los parámetros de la sostenibilidad débil y fuerte. (López, 2012)

3.3 SOSTENIBILIDAD DEBIL Y SOSTENIBILIDAD FUERTE

Fueron planteadas estos dos tipos de sostenibilidad por el Informe de Desarrollo Humano 2011 del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (Legrand, 2011)

La distinción entre sostenibilidad débil y la sostenibilidad fuerte como tipos ideales permite diferenciar y describir distintos modelos de sostenibilidad desarrollados. (Legrand, 2011)

La sostenibilidad débil considera que el capital natural puede ser sustituido por capital humano, fruto del desarrollo tecnocientífico, con tal de que el nivel total permanezca constante; el criterio de sostenibilidad fuerte, en cambio, toma en consideración la existencia de un capital natural crítico que no puede sustituirse por el humano. El capital natural crítico puede definirse como capital natural que es responsable de funciones medioambientales esenciales y que no puede sustituirse por capital humano. (Legrand, 2011)

Enfoques de la sostenibilidad débil (Legrand, 2011):

- Son acciones dirigidas a paliar o mitigar los efectos negativos del cambio ambiental sobre el desarrollo económico y social.
- No pone en cuestión el modelo de sociedad en que vivimos, el origen de los conflictos en la interacción entre sociedad y entorno natural.

Enfoques de la sostenibilidad fuerte (Legrand, 2011):

- Implica la reflexión amplia sobre el origen de los conflictos resultantes de la interacción entre los ámbitos del desarrollo económico y la evolución del entorno ambiental, así como el social (vincular el ámbito económico, el ambiental y el social).
- Relaciona las problemáticas locales con las mundiales.
- Visión amplia e integral de los nuevos retos sociales. La cuestión de la sostenibilidad como problemática y reto a afrontar, se presenta al mismo tiempo como una oportunidad de transformación social, para afrontar conflictos existentes en otros ámbitos de la organización y vida social característicos de nuestro siglo. Iniciativa arriba/abajo.
- Acciones y políticas a medio y largo plazo, si bien la sostenibilidad se considera una meta permanente.

Los gobiernos definen sus políticas ambientales a través de la regulación directa aunque, en algunos casos, se emplean otros mecanismos tales como los instrumentos económicos y fiscales como alternativas y/o complemento a la regulación. Alternativamente, y con el fin de medir la realidad medioambiental y las pautas de sustentabilidad, algunos países han desarrollado indicadores económicos, ecológicos y sociales, así como nuevos instrumentos de medición que se presenta en el apartado 2.4. (Duran, 2013)

3.4 HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD

Los sistemas de indicadores de la sostenibilidad funcionarán como una herramienta que permite evaluar el grado de avance o el logro de las metas propuestas, así como también de las políticas de acción formuladas para el cumplimiento de éstas, erigiéndose así en una poderosa herramienta que permita a todos los interesados orientar sus decisiones hacia el logro del desarrollo sostenible. (Paternoster, 2006)

Los indicadores se constituyen en facilitadores del proceso de toma de decisiones.

Ellos pueden ayudar a medir y calibrar el progreso hacia las metas de desarrollo sostenible. Por otro lado, ellos pueden constituirse en verdaderas señales de alerta que prevengan daños económicos, sociales y ambientales. (Paternoster, 2006)

Un indicador es una medida que permite observar el parámetro de avance en el cumplimiento de objetivos y metas que proporciona un medio sencillo y fiable para medir logros, reflejar los cambios vinculados con una investigación o ayudar a evaluar los resultados de un organismo de desarrollo. (ASC, 2012)

Un sistema de indicadores para la sostenibilidad es un conjunto de instrumentos de control y evaluación de la mejora medioambiental y la calidad de vida, indispensables para hacer operacional el concepto de desarrollo sostenible. (Miliarium, 2003)

La función de estos indicadores es la de proporcionar, a lo largo del tiempo, información sobre los avances en el campo del desarrollo sostenible, y a su vez poder dar a conocer a los ciudadanos estos avances. (Miliarium, 2003)

Características de los indicadores (Miliarium, 2003):

- Deben ser exactos, inequívocos y específicos.
- Deben ser comprensibles y fáciles de interpretar.
- Deben ser accesibles y sencillos de obtener.
- Deben ser significativos y relevantes.
- Deben ser sensibles a los cambios.
- Deben ser válidos, científicamente solventes, verificables y reproducibles
- Deben ser herramientas útiles para la acción.

Existen distintos tipos de indicadores utilizados para la creación de un sistema de indicadores para la sostenibilidad (Miliarium, 2003):

- a. **Indicadores sociales.**
- b. **Indicadores ambientales.**
- c. **Indicadores económicos.**

Los indicadores económicos son comúnmente los más usados. Sin embargo, los indicadores sociales y ambientales son esenciales para tener un panorama más completo de lo que ocurre con el desarrollo. (Miliarium, 2003)

3.4.1 Indicadores sociales

Al igual que los indicadores económicos, los indicadores sociales, por si solos no miden la sostenibilidad de un país, lo hacen en conjunto con el resto de indicadores de un sistema. (Miliarium, 2003)

Estos indicadores son utilizados para evaluar el nivel de bienestar de una sociedad. El acceso a la sanidad pública, el derecho a la cultura, la exigencia de cubrir las necesidades básicas de la población y en general todos aquellos estándares que se relacionan con la calidad de vida, como parte integrante de un desarrollo plenamente sostenible. (Miliarium, 2003)

En la Tabla 3-2 se detallan los indicadores sociales que son útiles para la medición de sostenibilidad, que dentro de los más comúnmente usados son la tasa de mortalidad, tasas de escolaridad, tasas de desempleo:

Tabla 3-2 Tipos de indicadores sociales

Indicador	Subindicador	Indicador de medición
Equidad	Pobreza	Porcentaje de la población viviendo bajo la línea de la pobreza
		Índice de desigualdad de ingresos (Índice de Gini)
		Tasa de desempleo
	Género	Relación entre los salarios medios de los hombres y de las mujeres
Salud	Nutrición	Estado nutricional de los niños

Indicador	Subindicador	Indicador de medición	
	Mortalidad	Peso suficiente al nacer	
		Tasa de mortalidad infantil bajo los 5 años	
		Esperanza de vida al nacer	
		Tasa de mortalidad derivada de la maternidad	
	Saneamiento	Porcentaje de la población que dispone de instalaciones adecuadas para la eliminación de excrementos	
		Porcentaje de productos químicos potencialmente peligrosos vigilados en los alimentos	
	Agua potable	Población con acceso al agua potable	
	Atención médica	Porcentaje de la población con acceso a la salud	
		Vacunación contra enfermedades infecciosas infantiles	
		Tasa de utilización de métodos anticonceptivos	
		Gasto nacional en servicios locales de salud	
		Gasto nacional total en el sector de la salud como porcentaje del PNB	
	Educación	Nivel Educativo	Tasa de variación de la población en edad escolar
			Tasa de escolarización en la enseñanza primaria
			Tasa de escolarización en la enseñanza secundaria
Tasa de alfabetización de adultos			
Niños que alcanzan el quinto grado de la enseñanza primaria			
Esperanza de permanencia en la escuela			
Diferencia entre las tasas de escolarización masculina y femenina			
Asentamientos Humanos	Población urbana	Tasa de crecimiento de la población urbana	
		Porcentaje de la población que vive en zonas urbanas	
		Población de los asentamientos urbanos autorizados y no autorizados	
	Condiciones de vida	Consumo de combustibles fósiles por habitante en vehículos de motor	
		Pérdidas humanas y económicas debidas a desastres naturales	
		Superficie útil por persona	
		Relación entre el precio de la vivienda y el ingreso	
		Gasto en infraestructura por habitante	
	Seguridad	Número de crímenes registrados por cada 100 mil habitantes	
	Población	Cambio	Tasa de crecimiento demográfico

Indicador	Subindicador	Indicador de medición
	poblacional	Tasa de migración neta
		Tasa de fecundidad total
		Densidad de población

Fuente: CEPAL (2003).

3.4.2 Indicadores ambientales

Los indicadores ambientales son aquéllos que evalúan el estado y la evolución de determinados factores medioambientales como pueden ser el agua, el aire, el suelo, etc. (Miliarium, 2003)

Un indicador ambiental es un valor o número que indica el estado y desarrollo del medio ambiente y las condiciones que afectan al mismo siendo, por tanto, el objetivo de estos indicadores ambientales suministrar información sobre el medio ambiente y, como todos los indicadores, representar, de la forma más simple, la complejidad del sistema que se quiere conocer sin perder el rigor científico además de servir de guía para la toma de decisiones políticas. Además, por regla general, se consideran de gran utilidad como complemento de los agregados económicos convencionales. (Duran, 2013)

En la Tabla 3-3 se muestran todos los indicadores ambientales que actualmente existen para la medición de sostenibilidad.

Tabla 3-3 Tipos de indicadores ambientales

Indicador	Subindicador	Indicador de medición
Tierra	Agricultura	Superficie cultivable por habitante
		Utilización de abonos
		Utilización de plaguicidas agrícolas
		Tierras de regadío como porcentaje de las tierras cultivables
		Utilización de energía en la agricultura

Indicador	Subindicador	Indicador de medición	
		Superficie de tierras afectadas por la salinización y el anegamiento	
		Educación agrícola	
	Bosques	Superficie de bosques protegidos como porcentaje de la superficie total de bosques	
		Intensidad de la tala de bosques	
		Variación de la superficie de bosques	
		Porcentaje de la superficie de bosques que está regulado	
	Desertificación	Tierras afectadas por la desertificación	
		Población que vive por debajo del umbral de pobreza en las zonas áridas	
		Índice nacional de precipitaciones mensuales	
		Índice de vegetación obtenido por teleobservación	
	Urbanización y ordenamiento territorial	Superficies de los asentamientos urbanos autorizados y no autorizados	
		Cambios en el uso de la tierra	
		Cambios en el estado de las tierras	
		Ordenación de los recursos naturales descentralizada a nivel local	
	Océanos, mares y costas	Zona costera	Concentración de algas en las aguas costeras
			Crecimiento demográfico en las zonas costeras
Pesquerías		Captura máxima permisible del sector pesquero	
Agua dulce	Cantidad de agua	Extracción anual de aguas subterráneas y de superficie	
		Consumo doméstico de agua por habitante	
		Reservas de aguas subterráneas	
	Calidad del agua	Concentración de bacterias coliformes fecales en el agua dulce	
		Demanda bioquímica de oxígeno en las masas de agua	
		Tratamiento de las aguas residuales	
		Descargas de petróleo en aguas costeras	
		Descargas de nitrógeno y de fósforo en las aguas costeras	

Indicador	Subindicador	Indicador de medición
Biodiversidad	Ecosistemas	Superficie protegida como porcentaje de la superficie total
	Especies	Especies amenazadas como porcentaje del total de especies autóctonas
Residuos	Residuos domésticos	Eliminación de desechos domésticos por habitante
		Gastos en gestión de desechos
		Eliminación municipal de desechos
	Residuos peligrosos	Importaciones y exportaciones de desechos peligrosos
		Superficie de tierras contaminadas con desechos peligrosos
		Gastos en tratamiento de desechos peligrosos
	Productos tóxicos	Intoxicaciones agudas por productos químicos
Número de productos químicos prohibidos o rigurosamente restringidos		
Biotecnología	Biotecnología	Gastos de investigación y desarrollo en el ámbito de la biotecnología
		Existencia de reglamentos o directrices sobre bioseguridad

Fuente: CEPAL (2003).

3.4.3 Indicadores económicos

Su función es evaluar el nivel económico y la prosperidad de un país por medio de cálculos, estadísticas y estándares establecidos. La mayoría de los indicadores económicos utilizados tradicionalmente, reflejan la sostenibilidad combinados con otro tipo de indicadores (ambientales y/o sociales). (Miliarium, 2003)

La tabla 3-4 detalla los indicadores económicos que pueden ser útiles en la medición de sostenibilidad, tanto sus subindicadores como el indicador de medición para cada uno de los mismos:

Tabla 3-4 Tipos de indicadores económicos

Indicador	Subindicador	Indicador de medición
Estructura económica y Evolución de las modalidades de consumo	Desempeño de la economía	Producto interno bruto por habitante
		Porcentaje de la inversión neta en el producto interno bruto
		Producto interno neto ajustado conforme a consideraciones ambientales
	Importaciones y exportaciones y políticas internas conexas	Balance del comercio en bienes y servicios
		Suma de las exportaciones y las importaciones como porcentaje del producto interno bruto
		Porcentaje de productos manufacturados en las exportaciones totales de mercancías
		Importaciones de bienes de capital
		Inversión extranjera directa
		Porcentaje de importaciones de bienes de capital ecológicamente racionales
		Donaciones de cooperación técnica
	Estatus financiero	Relación entre deuda y producto nacional bruto
		Total de la asistencia oficial para el desarrollo concedida o recibida, como porcentaje del producto nacional bruto
		Relación entre el servicio de la deuda y las exportaciones
		Relación entre la transferencia neta de recursos y el producto nacional bruto
		Gasto en protección del medio ambiente como porcentaje del producto interno bruto
		Cuantía de la financiación nueva o adicional para el desarrollo sostenible
	Consumo de recursos	Intensidad de utilización de recursos
		Aportación de las industrias con utilización intensiva de recursos naturales al valor añadido del sector manufacturero
		Proporción del valor añadido del sector manufacturero en el producto interno bruto
		Reservas comprobadas de minerales
		Reservas comprobadas de combustibles fósiles

Indicador	Subindicador	Indicador de medición
		Duración de las reservas comprobadas de energía
	Uso de Energía	Consumo anual de energía per cápita
		Proporción del consumo de recursos energéticos renovables
		Intensidad en el uso de energía
	Generación de residuos	Generación de residuos sólidos industriales y municipales
		Generación de residuos peligrosos
		Generación de residuos radiactivos
		Reciclado y reutilización de residuos
	Transporte	Distancia de viaje per cápita por medio de transporte

Fuente: CEPAL (2003).

3.5 HUELLA ECOLÓGICA

Uno de los indicadores medioambientales con mayor aceptación es la huella ecológica, concepto ideado originalmente para cuantificar el nivel de sostenibilidad del desarrollo urbano, pero cuya aplicación para evaluar el de los procesos productivos es también una realidad. (Herva, 2008)

La incompatibilidad entre el modelo de desarrollo actual y la preservación del medio ambiente es una realidad que se refleja en la contraposición del primero a los fundamentos del desarrollo sostenible, que se define como aquel que asegura las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para enfrentarse a sus propias necesidades. (Herva, 2008)

3.5.1 Definición de huellas ambientales

Las huellas ambientales son aquellas basadas en las áreas productivas y flujo de cargas ambientales, se clasifican en:

- a. **Huella ecológica:** Área de tierra o agua, requerida para producir los recursos consumidos y asimilar los desperdicios generados de una población definida. La Huella Ecológica es un instrumento para contabilizar

los recursos utilizados ampliamente como instrumento de administración y comunicación por gobiernos, empresas, instituciones educativas y organizaciones no gubernamentales para saber cuánta capacidad biológica del planeta se requiere para determinada actividad humana o población. (GFN, 2009)

- b. Huella de Carbono:** Emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que se realizan en la cadena de producción de bienes, iniciando desde la adquisición de materia prima hasta el tratamiento de los desechos del proceso (HC, 2009)
- c. Huella hídrica:** Indicador de uso de agua que tiene en cuenta tanto el uso directo como también el indirecto por parte de un consumidor o productor (WFN, 2011).

En la Figura 3-2 se muestran los tipos de huellas ambientales en donde en el caso de la huella ecológica presenta la ventaja sobre las demás huellas que por ser un indicador de índice único es posible comparar desde las emisiones de transportar un bien en particular con la energía requerida para el producto sobre la misma escala (hectáreas). (Herrera, 2010)



Figura 3-2 Tipos de huellas ambientales.

Fuente: Sachs (2008).

3.5.2 Generalidades de Huella ecológica

La huella ecológica es un indicador de sostenibilidad, de índice único, se utiliza para conocer y medir todos los impactos producidos por una población expresados en hectáreas de ecosistemas o de naturaleza. (Domenech, 2008)

Se utiliza, por tanto, para conocer cómo afectan los hábitos de vida del ser humano al medio ambiente que nos rodea y qué área de producción de recursos es necesaria para poder mantener los hábitos de vida de las personas y asimilar los residuos que generamos. (Domenech, 2008)

Este indicador fue desarrollado por Mathis Wackernagel y William Rees en el año de 1990. (Domenech, 2008)

Se utiliza habitualmente para países o regiones, de igual manera se puede aplicar a organizaciones, empresas o cualquier proceso. (Domenech, 2008)

En concreto, este indicador mide la superficie de tierra biológicamente productiva y el agua de área necesaria para producir todos los recursos consumidos por un individuo, población o actividad, y para absorber los residuos que se generan, dadas las tecnologías y las prácticas de manejo de recursos prevaletientes. (Domenech, 2008)

En la Figura 3-3 se muestra los distintos tipos de área que considera la huella ecológica.



Figura 3-3 Huella ecológica del hombre.

Fuente: GFN (2009).

3.5.3 Fundamentos de la huella ecológica

Las consideraciones en las cuales se basa la huella ecológica son las siguientes (GFN, 2009):

- a) Se puede dar seguimiento a la mayoría de recursos que las personas y actividades consumen y los desechos que generan.
- b) La mayoría de recursos y residuos se pueden medir en términos de área biológicamente productiva necesarias para mantenerlas, aquellos flujos que no pueden ser medidos en área biológicamente productiva son excluidos de la evaluación.
- c) Cada área se ajusta en proporción a su bioproductividad (capacidad biológica, que es la habilidad de un ecosistema para producir materiales biológicos útiles y para absorber desechos generados por humanos, por lo que diferentes tipos de zonas se pueden convertir a una unidad común promedio: hectárea global.
- d) Debido a que una hectárea global demandada representa un uso particular que excluye cualquier otro uso y que todas las hectáreas globales en un solo año representan la misma cantidad de bioproductividad, en conjunto, representan la demanda agregada o huella ecológica.
- e) La demanda de las personas puede ser directamente comparada con la bioproductividad global, regional, nacional o local.
- f) El área necesaria puede exceder la disponible, lo que indica que el ecosistema no es sostenible.

Para la evaluación de la huella ecológica se tienen seis áreas productivas, las cuales son (GFN, 2009):

- a) Tierra de cultivo:** Son las más bioproductivas, está compuesta por el área destinada para siembra de alimentos y fibras para consumo humano,

alimento para ganado, cultivo de aceite madera y caucho. El 12% de toda la superficie terrestre es dedicada a tierra de cultivo para el año 2013. (FAO, 2013).

- b) Pastizales:** Se utilizan para la cría de ganado de carne, productos lácteos, piel y productos de lana. La huella de este tipo de tierra se calcula por la comparación de la cantidad de alimento para el ganado disponible de un país. Se tiene, según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 3.7 millones de hectáreas, para el año 2013. (FAO, 2013).
- c) Bosques para obtener madera y leña:** La estadísticas de la FAO estiman que el 30% de la superficie terrestre es destinada a bosques. Es superficie ocupada por los bosques, de donde, principalmente se obtienen productos derivados de la madera, empleados en la producción de bienes, o también de combustibles como leña. (CEPAL, 2003)
- d) Pesquería:** Las zonas de pesca se han calculado utilizando las estimaciones de la captura máxima sostenible para una variedad de especies de peces. En 2007, globalmente hubo 2.4 millones de hectáreas de pesquería continental y 433 millones de hectáreas de zonas de aguas continentales. (GFN, 2009)
- e) Tierra urbanizada:** Terreno cubierto por la infraestructura, el transporte, la vivienda, estructuras industriales, y embalses para centrales hidroeléctricas. En 2007, la tierra urbanizada ocupaba 167 millones de hectáreas de tierra en todo el mundo en 2007. (GFN, 2009)
- f) Bosques para la absorción de dióxido de carbono:** Cantidad de terreno forestal para la absorción de emisiones de dióxido de carbono, principalmente por la quema de combustibles fósiles. (GFN, 2009)

3.5.4 Metodología de cálculo de huella ecológica

La metodología de cálculo de huella ecológica que se puede implementar dependerá del objeto de estudio, así se muestra en la Figura 3-4 las diferentes

huellas ecológicas a las cuales se les puede aplicar una metodología específica:

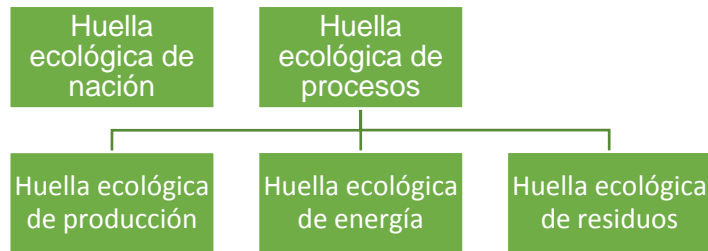


Figura 3-4 Tipos de huellas ecológicas que se les puede aplicar una metodología específica.

Fuente: GFN (2009)

- **Huella ecológica de nación.**

La huella ecológica de una nación, se calcula determinando el terreno necesario para sustentar el consumo y la absorción de desechos derivado del mismo, para un grupo poblacional dado, en hectáreas. A su vez, el consumo local se calcula a partir de la producción, sumando las exportaciones y restando las importaciones.

$$\text{Consumo local} = \text{Producción} + \text{Importación} - \text{Exportación} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

La metodología para la huella ecológica de una nación tiene los siguientes pasos (Moore, 2011):

1. Contabilizar el consumo de las diferentes categorías estudiadas en unidades físicas (peso, energía). En el caso en que no existan datos directos de consumo, se estiman los consumos para cada producto con la expresión ya mencionada:

$$\text{Consumo aparente} = \text{Producción} - \text{Exportación} + \text{Importación} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

2. Transforman esos consumos en superficie biológicamente productiva apropiada a través de los índices de productividad.

$$\text{Área} = \frac{\text{Consumo}}{\text{rendimiento}} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Una vez contabilizados los consumos y aplicados los índices de productividad se dispone ya de las diferentes superficies productivas consideradas (cultivos, pastos, bosques, mar o superficies artificiales).

3. Convertir las superficies biológicamente productivas apropiadas (asociación de un tipo de terreno) utilizando los factores de equivalencia.

$$\text{H.E} = \frac{\text{Consumo}}{\text{Productividad}} \times \text{Factor de equivalencia} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Dentro de cada categoría, la HE es la suma de todas las HE para cada subcategoría y producto.

4. Sumatoria de HE de las diferentes categorías:

$$\text{HE}_{\text{nación}} = \sum_{\text{Categoría}} \text{HE} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

La HE de una región o país es a su vez la sumatoria de todas las HE para cada categoría.

Cada terreno dispone de productividades biológicas diferentes (por ejemplo: una hectárea de cultivos es más productiva que una de mar), y antes de sumarlas es necesario proceder a lo que se define como normalización. Para ello, cada superficie se pondera mediante factores de equivalencia los cuales se muestran en la Tabla 3-5, que expresan la relación entre la productividad biológica de cada categoría de terreno respecto al promedio de productividad de la superficie del planeta. (RES, 2011)

Una vez aplicados los factores de equivalencia a cada terreno de superficie calculada disponemos ya de la huella ecológica expresada en lo que se conoce como hectáreas globales (gha). Ahora sí, se puede proceder a sumar todas ellas, y así obtener la huella ecológica total. (RES, 2011)

Tabla 3-5 Factores de equivalencia 2007

Tipo de terreno	Factor de equivalencia
Tierras de cultivo	2.51
Bosques	1.26
Tierras de pastoreo	0.46
Agua marina y continental	0.37
Tierra urbanizada	2.51

Fuente: EFA (2010).

Los factores de equivalencia además de variar con cada tipo de terreno varían en el tiempo, es decir que sufren modificaciones de acuerdo a las productividades de los terrenos a través de los años.

- **Huella ecología de producción.**

Se desarrolla el primer paso de la huella ecológica de nación, luego se debe aplicar la siguiente fórmula (GFN 2009):

$$EF_P = \frac{P}{Y_N} \times YF \times EQF \quad (\text{Ec.3.6})$$

Donde:

- P: Producto cosechado
- Y_N : Rendimiento nacional del producto (o su capacidad de absorción de carbono)
- YF: Factor de rendimiento
- EQF: Factor de equivalencia

- **Huella ecológica de energía.**

La huella ecológica se calcula de manera diferente dependiendo de la fuente de energía considerada. Para los combustibles fósiles la huella ecológica mide el área de absorción de CO₂, obtenida a partir del consumo total de energía, tanto el directo como el asociado a la producción y distribución de los bienes y servicios consumidos, dividido por la capacidad de fijación de CO₂ de la superficie forestal. (UNESA, 2006)

Para energías renovables (renovables, hidroelectricidad) generalmente se asocia directamente a terreno construido, para la obtención de la misma. (UNESA, 2006)

Capítulo 4 EVALUACIÓN DE HUELLA ECOLÓGICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN EL SALVADOR

4.1 DESCRIPCIÓN DE CASO DE ESTUDIO

El caso bajo estudio es el proceso productivo de BD a partir del aceite de maní, higuierillo y tempate y el proceso productivo de BE a partir de melaza; las cuales son las actuales formas de producción de biocombustibles en El Salvador.

4.1.1 Descripción de los procesos de producción

En cada proceso productivo se detalla cada una de las etapas necesarias para la obtención de los biocombustibles líquidos. Estas etapas llevan descritos los procesos que se involucran en las mismas.

A. Biodiesel

Los límites del sistema del proceso productivo de BD, serán desde el ingreso de aceite crudo hasta la salida del BD; en cuanto a la siembra y cosecha se toma en cuenta la productividad natural de las diferentes semillas, es decir el rendimiento de producción de semillas oleaginosas por hectárea de terreno.

El proceso productivo de BD, se lleva a cabo en las siguientes etapas

a) Siembra y cosecha

La siembra y cosecha de las semillas oleaginosas se lleva a cabo bajo los parámetros y condiciones mostrados en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Parámetros de siembra y cosecha de semillas oleaginosas

Materia	Siembra	Cosecha	Fuente
Higuerillo	<p>Se hace la preparación del terreno en forma manual o mediante la aplicación de un herbicida, se prefiere el periodo de junio a agosto.</p> <p>La fertilización del cultivo es de 15-15-15 de sulfato de amonio a dosis de 20gramos. Es necesario para un área de manzana de cultivo 3.18 kg de semilla.</p>	<p>Se utiliza como índice de corta el secamiento de la panoja. La cosecha se debe de realizar cortando con tijera de apodar todo el racimo que contiene los frutos secos.</p>	<p>López, B., Campos, M., y Clímaco, L. (2008)</p>
Tempate	<p>La semilla se coloca con la cicatriz hacia abajo, sembrar de 2 a 2.5 cm de profundidad, colocando 2 semillas por postura, se ejecuta la siembra entre los meses de mayo a junio.</p> <p>Se recomienda, durante el primer año aplicar una fertilización entre 45 y 60 días después del trasplante, 82 gramos de fertilizante completa de cualquiera de las fórmulas (15-15-15, 12-30-10 ó 18-46-0 de Nitrato- Fósforo y Potasio) y 41 gramos de Urea por planta. A partir del segundo año la fertilización se hará 30 a 40 días después del inicio de las lluvias.</p> <p>Rendimiento a los 5 años 5 t/ha de semilla seca.</p>	<p>Se realiza manualmente 2 veces por semana, para la cosecha se necesita disponer canastos, para recoger los frutos y echar en sacos para su traslado</p>	<p>Samayoa (2008)</p>
Materia	Siembra	Cosecha	Fuente
Maní	<p>Se realiza en la primera quincena de agosto hasta</p>	<p>El Arranque manual consiste en remover la</p>	<p>Delgado, V. y</p>

	<p> finales de septiembre. Tiene un ciclo de 4 a 4.5 meses y se identifica su madurez cuando en el interior de la vaina el color pasa de plateado a castaño. En suelo de media a buena fertilidad produce de 1.400 a 2.500 Kg/ha</p>	<p> tierra con arado para evitar que las frutas queden bajo tierra. Una vez arrancado se vuelcan y se acordonan formando hileras. Se dejan en el campo de 5 a 7 días para el secado al sol. Luego se golpea la planta seca contra el borde de una madera o alambre tenso a fin de producir el desprendimiento de las vainas.</p>	<p> Cabral, I. (2010)</p>
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------

b) Recepción de aceite

Una vez extraído el aceite, el proceso de producción de BD inicia con la recepción del aceite crudo el cual debe de cumplir las características apropiadas (Tabla 4-2).

Tabla 4-2 Propiedades del aceite crudo para la producción de biodiesel

Propiedades	Unidades	Valor
Densidad Aceite @ 20°C	kg/m ³	925.8 ¹
Humedad	%W	< 2
Volátiles (no agua)	%W	< 1
Impurezas Insolubles	%W	< 0.75
Índice de Acidez	mgKOH	218
Índice de Saponificación	mgKOH	235
Índice de Yodo	mgI ₂	283
Material Insaponificable	%W	< 2

Fuente: Adaptado de BRC (2008).

c) Lavado de aceite

Pretratamiento que consiste en lavar el aceite con agua y dejarlo decantar por un día.

d) Desgomado

El propósito principal es hacer precipitar el material insaponificable en forma de gomas, se logra la precipitación utilizando agua, para el caso de la materia insaponificable hidrosolubles y ácido fosfórico para las insolubles en el agua. (BRC, 2008)

e) Transestrificación ácida

Es el proceso mediante el cual los ácidos grasos libres (AGL) presentes en el aceite son convertidos en alquil-ésteres (biodiesel), para esto se adiciona ácido

¹ Para efectos de presentación se ha establecido una densidad promedio que tiene el aceite para su recepción, basados en Benavides, A. (2007), Martínez, B. (2011) y Bailey A. (1984).

sulfúrico y alcohol al aceite, el ácido funciona sólo como catalizador y el alcohol reacciona para producir alquil-éster y agua.

La transesterificación ácida se hace cuando el aceite contiene más del 4% en peso de ácidos libres (esto se determina por neutralización de una muestra y determinación del índice de acidez), cuando el porcentaje de AGL es menor al 2% en peso se pasa directamente a la neutralización para transformar los AGL en jabones logrando de esta forma mayor conversión y eficiencia del proceso. (BRC, 2008).

f) Neutralización

La neutralización se puede dar en dos escenarios diferentes, si hay TEA se debe neutralizar el ácido sulfúrico utilizado como catalizador, si no hay TEA pero el aceite tiene AGL, éstos deben ser neutralizados para optimizar la reacción de producción de biodiesel.

La neutralización consiste en la adición de la cantidad adecuada de hidróxido de sodio en solución al 48% en peso (con agua) para eliminar la presencia de ácidos en el aceite, la cantidad adecuada se halla por estequiometría según la cantidad de ácido sulfúrico de la TEA o el porcentaje de AGL. (BRC, 2008)

g) Secado

Consistente en extraer el agua formada producto de la neutralización. (BRC, 2008).

h) Filtrado

En esta etapa se filtra el precipitado generado en la neutralización y jabón y glicerina formada en durante la TEA y la neutralización. (BRC, 2008)

i) Preparación de alkóxido de catalizador

Antes de la producción del biodiesel se hace una premezcla del alcohol y el catalizador para garantizar que este último llegue disuelto a la reacción central.

Estrictamente hablando no se trata de metóxido/etóxido de sodio/potasio pues este compuesto es bastante inestable y se descompone fácilmente en el alcohol y la base de los cuales proviene. Lo que se hace es simplemente una solución de catalizador en alcohol. (BRC, 2008)

j) Producción de Biodiesel (BD)

Después de tener el aceite apto y de haber preparado la solución de catalizador se puede proceder a la reacción del biodiesel.

k) Separación de glicerina y catalizador

Una vez se completa la reacción, se tiene una mezcla de biodiesel con glicerina y alcohol, el primer paso para la obtención del biodiesel puro es la separación de la glicerina. Esta separación se hace utilizando un separador centrífugo.

l) Secado: separación de agua y alcohol

Luego de retirar la glicerina y los materiales más pesados, se procede a la separación de los materiales volátiles, es decir el alcohol y los remanentes de agua, lo cual se logra a través de un evaporador.

El alcohol adicionado al aceite para la reacción del biodiesel está en un exceso aproximado de 6:1 respecto al que reacciona, este alcohol sobrante debe ser recuperado pues de lo contrario el proceso sería muy costoso. (BRC, 2008)

m) Lavado

Luego de separar los materiales volátiles se procede a limpiar el biodiesel de otras impurezas, esto se hace mezclándolo con sólidos de lavado que absorben dichas impurezas.

n) Filtrado

Etapas consistentes en la separación de impurezas y sólidos de lavado del biodiesel.

Los insumos y reactivos que se emplean en el proceso productivo de BD deben de poseer las características y proporciones mostradas en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Características de los insumos y reactivos empleados en la producción de biodiesel

Reactivo	Etapas empleadas	%p/p de agua	Requerimientos del proceso
Ácido fosfórico	Desgomado	15	La cantidad necesaria varía entre 0.03 y 0.1% en peso de la cantidad de aceite
Agua	Desgomado		El porcentaje a adicionar es entre 1 y 5%p/p, según la calidad del aceite.
Ácido sulfúrico	TEA	2	La dosificación depende de la cantidad del AGL y varía entre 0.1 y 0.75% en peso respecto al aceite.
Hidróxido de sodio	Neutralización	48	La cantidad adecuada es dada por estequiometría según el porcentaje de AGL.
Alcohol	Transesterificación		Si los AGL son superiores al 4% se realiza una transesterificación previa, en la cual la cantidad de alcohol dependerá de estos mismos. El alcohol adicionado al aceite para la reacción del BD está en un exceso aproximado de 6:1 molar respecto al que reacciona.
Catalizador (NaOH ó KOH)	Transesterificación		Los mejores resultados se logran cuando se implementa el 1.0 % de NaOH. (Peso de NaOH/peso de aceite). (Ahmad (2008) y Balat (2010))
Silicato de magnesio	Lavado de biodiesel		Sólido de 50µm aproximadamente, se adicionan en una proporción del 2 a 4%

Reactivo	Etapa empleada	%p/p de agua	Requerimientos del proceso
			respecto a la cantidad de BD cargado.

Fuente: Adaptado de BRC (2008).

El diagrama de flujo de proceso y los límites del sistema del proceso productivo se aprecia en la Figura 4-1

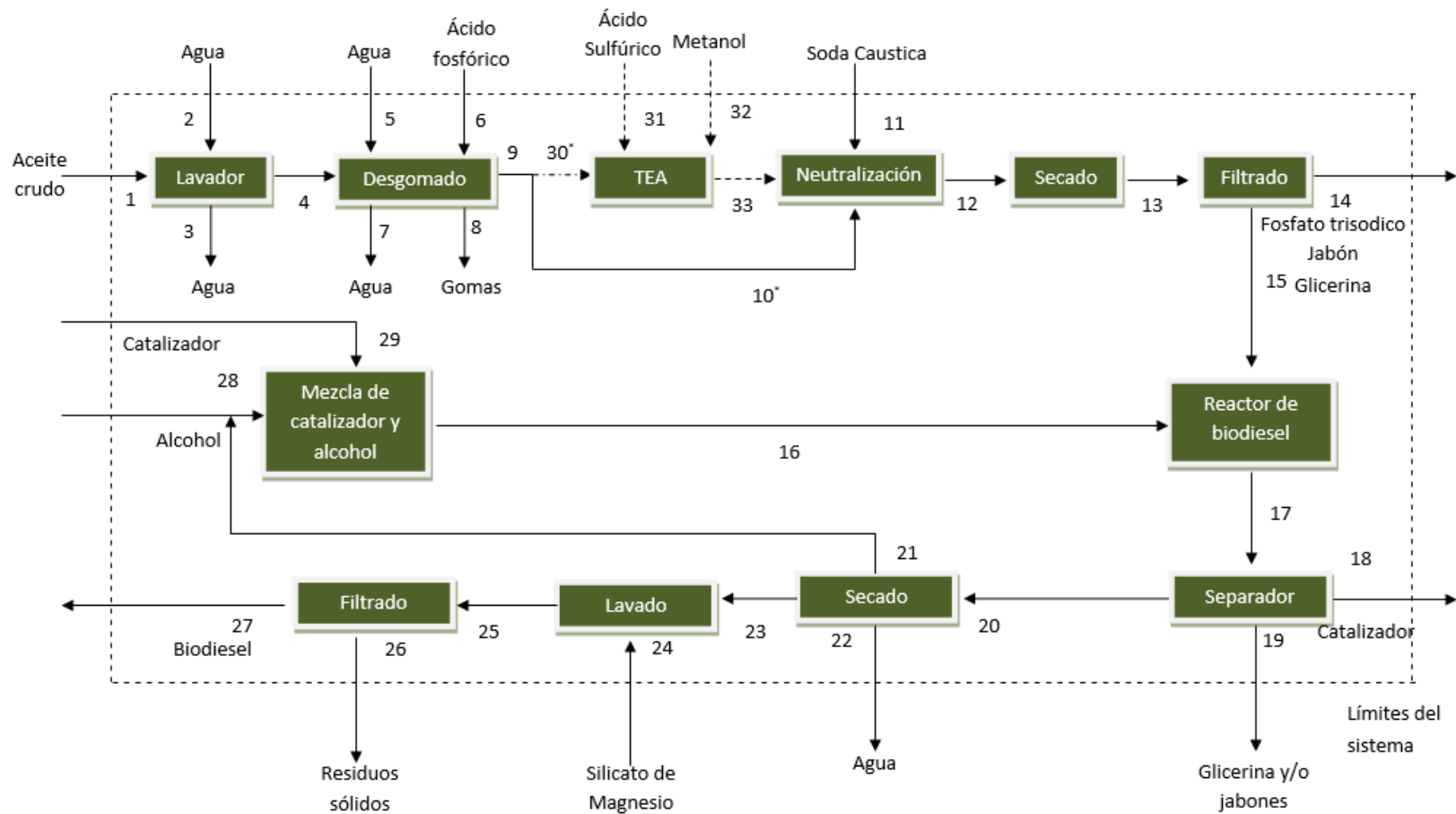


Figura 4-1 Proceso de producción de biodiesel²

Fuente: Elaboración propia basada en BRC (2008) y Castro, R. (2008)

² Si los AGL son inferiores al 2% se debe de seguir la corriente número 10, si son mayores del 4% continuar en la corriente 30, si es intermedia es opcional

B. Bioetanol

Para el estudio, los límites del sistema comprenden desde la entrada de la caña de azúcar al ingenio hasta la salida de BE, por ser la melaza la materia prima de producción de BE y un subproducto de la producción de azúcar.

En el proceso de extracción de la melaza se tiene en consideración la productividad natural de la caña de azúcar, es decir la cantidad de caña de azúcar que se puede producir en un área de terreno, también el consumo de energía a lo largo del procesamiento de la caña hasta obtener la melaza y por último los consumos tanto materiales como energéticos propios de la producción de BD y los residuos generados en el mismo (Figura 4-2). El proceso consta de las siguientes etapas:

a) Producción de azúcar

En el proceso productivo del azúcar se tienen los siguientes pasos a llevar a cabo:

o Siembra

La caña de azúcar se cultiva en más de cien países bajo condiciones templadas, subtropicales y tropicales aunque es un cultivo que prospera especialmente en las zonas tropicales o sub tropicales del mundo. Un cultivo muy eficiente puede producir hasta 120 toneladas de caña por hectárea por año (con 14 % de sacarosa, 14 % de fibra y 2 % de otros productos solubles). (Zepeda, 2012)

La caña de azúcar requiere de abundante agua y de suelos adecuados para crecer bien, además de una humedad relativa entre 55 y 85 % durante el período de crecimiento para favorecer el desarrollo del tallo. Su período de crecimiento varía entre 11 y 17 meses, dependiendo de la variedad de caña y de la zona. Requiere de nitrógeno, potasio y elementos menores para su fertilización. (Zepeda, 2012)

o **Cosecha.**

Las labores de cosecha de caña se realizan a partir del mes de noviembre hasta finales de abril, período que coincide con la época seca. Esta actividad se realiza bajo un programa que debe ajustarse cada mes de acuerdo al estado de maduración del cultivo, el cual es inducido o se da por madurez fisiológica.

El corte se puede hacer por quema manual o por máquina. De acuerdo con los resultados de la zafra 2012-2013, en El Salvador, se rozaron 108,917 manzanas de cañales de las cuales se obtuvieron 7, 151, 159.90 toneladas de caña molida, logrando un rendimiento de 68.0 TC/Mz, para el mismo periodo, el Ingenio La Cabaña, único productor de bioetanol, proceso 1, 028, 054.05 toneladas de caña destinando 14,964.00Mz de cultivo. (MAG, 2013)

o **Entrada.**

Inicia con el peso en básculas de las unidades que transportan la caña de azúcar en el ingenio y que se encuentran al ingreso del área industrial.

Además en esta parte se determina la calidad de la materia prima, tomando muestras que se analizan continuamente en el laboratorio de control de calidad.

Luego la caña se somete a un proceso de preparación que consiste en romper y desfibrar las celdas de los tallos por medio de troceadoras, picadoras oscilantes y desfibradoras, para poder pasar al proceso de extracción del jugo. (Magdalena, I., 2012a).

o **Molienda.**

Este es un proceso continuo que actualmente se realiza en tres tándems de molinos con capacidad de molienda diaria total de 32.200 TM, distribuido en tándem A (9,000 TM); tándem B (11,040 TM) y tándem C (11,960 TM).

La caña es sometida a una serie de extracciones utilizando molinos de rodillo o mazas y todos los molinos son de cuatro masas rayados en forma de V. Para hacer más eficiente el proceso de molienda, los jugos pobres de los molinos posteriores se aplican nuevamente en el proceso (maceración) y en el último molino se aplica agua caliente con temperatura entre 155-179 °F para aumentar la extracción.

Como primer subproducto, se da el bagazo el cual es transportado hacia el sistema de calderas para usarlo en calidad de combustible. El sobrante tiene como destino la hidrolización y reserva para cubrir paros de emergencia. (Magdalena, I., 2012a)

- o **Clarificación.**

El jugo proveniente de los molinos pasa por calentadores, que llegan a temperaturas entre 140 y 155 °F. Luego pasa por la torre de sulfatación, bajando el pH para producir azúcar blanco únicamente.

En esta etapa se utiliza azufre como agente decolorante; luego mediante la edición de la bachada de cal entre 6 y 10 baume se neutraliza el jugo. El calentamiento del jugo se realiza en tres etapas; la primera por vapor vegetal de 5.0 psi alcanzando temperaturas entre 175 y 185 °F; la segunda por vapor de 5.0 psi alcanzando temperaturas entre 205 y 215 °F y la última con vapor de 10 psi para rectificación del jugo en forma automática.

Con el proceso anterior se logra que el jugo, al ser liberado a presión atmosférica, sufra una pequeña evaporación en el tanque flash evitando que los flóculos floten o decanten con lentitud por la presencia de burbujas atrapadas en el interior. (Magdalena, I., 2012a).

- o **Evaporación.**

Evaporación elimina alrededor de 75 a 80 % del agua presente en el jugo clarificado, aumentando la concentración de los sólidos presentes en el jugo desde aproximadamente 15 a 65 °Brix. (Zepeda, 2012)

- o **Cristalización.**

Etapa que comprende la dosificación de tensoactivo para disminuir la viscosidad de la meladura cruda proveniente de la etapa de evaporación y además la adición de floculante catiónico que permite la separación de impurezas de la meladura cruda. (Zepeda, 2012)

- o **Cocimiento y cristalización**

Es el proceso en el cual la meladura obtenida es sometida a evaporación hasta su concentración máxima, por lo que a medida que la meladura se concentra su viscosidad aumenta rápidamente y luego comienzan a aparecer los cristales de azúcar. Una vez formados los cristales, se da la separación de los mismos a través de una operación de centrifugación, para posteriormente ser secados y refinados si así se desea. (Zepeda, 2012)

De esta etapa, se obtiene la melaza, la cual es un jarabe denso de color oscuro.

- b) Producción de BE**

Extraída la melaza dentro del proceso productivo de azúcar; conteniendo aproximadamente 80 a 88° brix y 46 a 60° de azúcares totales, es procesada para obtener BE, llevando a cabo las siguientes operaciones (Carranza, 2014) (Magdalena, I., 2012b).:

- o **Esterilización.**

Proceso llevado a una temperatura de 80°C aproximadamente, en donde se le eliminan todos los microorganismos patógenos que puedan competir con la levadura o que puedan contaminar el alcohol. (Carranza, 2014)

- o **Dilución.**

Terminada la esterilización, la melaza pasa a un proceso de dilución en donde se lleva la melaza a una solución que contenga del 20-30% de melaza. (Carranza, 2014)

- o **Fermentación.**

Al momento de tener la dilución se agrega las levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) y comienza el proceso de la fermentación permitiendo la oxigenación para cuidar la vida de la levadura y favorecer el proceso. (Carranza, 2014)

Pasado el tiempo de la fermentación se separa por medio de centrifugadoras las levaduras (crema de levadura) y el vino. El vino es bombeado para comenzar el proceso de destilación. (Carranza, 2014).

- o **Columna destrozadora.**

La función de esta etapa es extraer del mosto fermentado, todos los alcoholes y derivados de alcoholes que se forman en la fermentación. (Jimenez, 2011)

Se realiza una separación de todas las impurezas no volátiles, que consisten básicamente en materia orgánica y sales minerales, los vapores alcohólicos extraídos tienen una concentración aproximada de 70 a 90 °GL. El agua eliminada conteniendo todas estas impurezas es lo que se llama vinaza. (Torres, 2010)

- o **Columna concentradora.**

Los alcoholes son sometidos a una columna donde se busca aumentar la concentración de alcohol (Carranza, 2014)

- o **Columna hidroselectora.**

Se realiza un lavado del alcohol con el fin de realizar la separación de los compuestos menos volátiles, basándose en que la mezcla de pentanoles, propanol, isobutanol, etc. que se forma no es miscible con el agua. El alcohol sale por la parte inferior de la columna, con un grado alcohólico de 10-15°GL aproximadamente, casi limpio de impurezas volátiles excepto metanol. (Torres, 2010)

- o **Columna rectificadora.**

Finalmente en la columna rectificadora se concentra el alcohol desde 10-15 hasta 96 °GL y completamente limpio de impurezas como los aceites isopropanol, amidas, aminas, con la excepción del metanol. (Torres, 2010)

Como subproducto de la columna concentradora y rectificadora se obtienen las flemazas, que son la corriente que sale en el fondo de las columnas, se somete a una doble expansión para aprovechar así su calor. Las flemazas salen por el fondo de las columnas a una temperatura de 117° C y se recogen en un recipiente dividido en dos secciones, una de ellas opera a presión casi atmosférica, y por expansión produce vapor que es utilizado para el funcionamiento de la columna de hidroselección. (Tecnologías limpias, 2004)

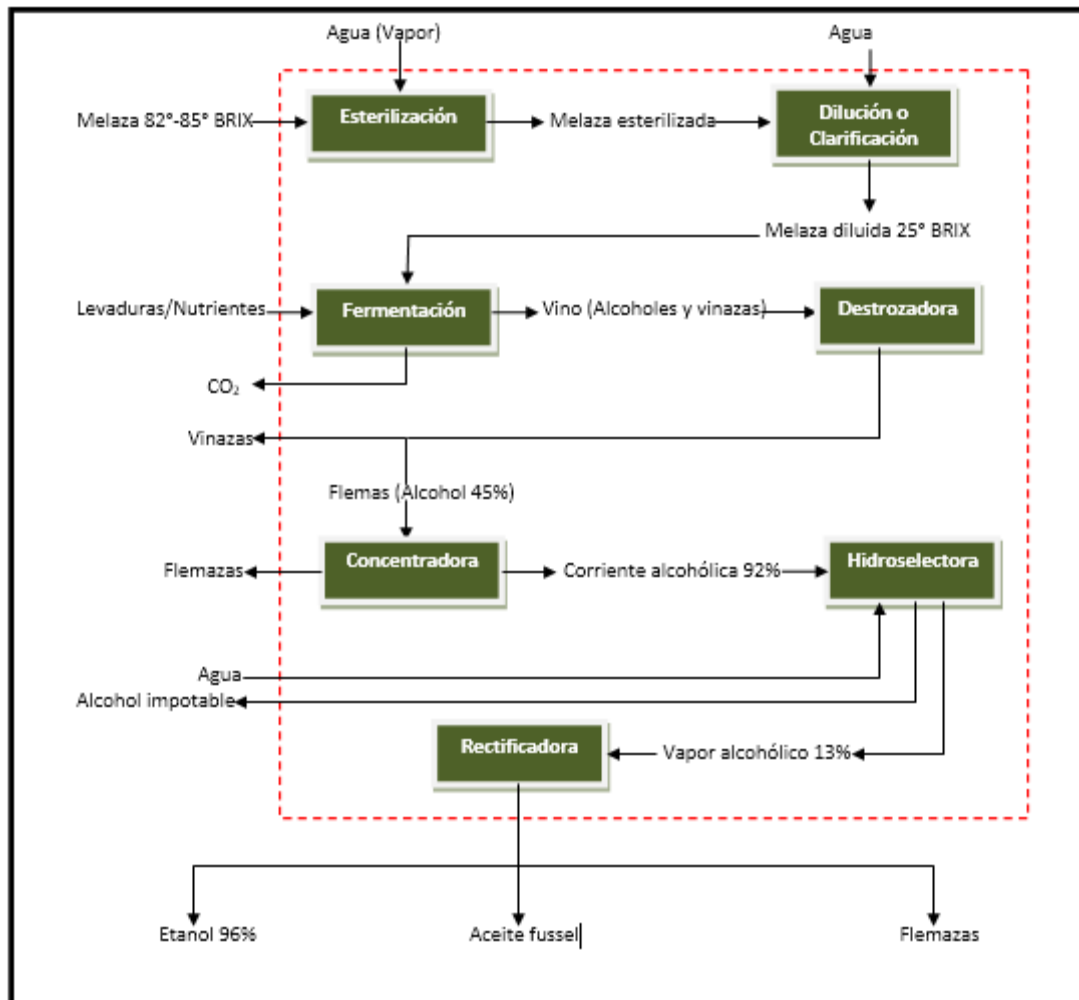


Figura 4-2 Proceso de producción de bioetanol

Fuente: Adaptado de Tabacal Agroindustria (2012).

4.2 BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN EL SALVADOR

Se presenta, a continuación el balance de materia y energía para el proceso productivo de BD y BE, teniendo en cuenta que no representa el consumo de materiales y energía anual (inventario de proceso) requerido para la producción, sino más bien la cuadratura de las corrientes que sirven de base para establecer el posterior inventario de proceso.

4.2.1 Biodiesel

En El Salvador se produce en base a tres tipos de aceites provenientes de semilla de maní, higuierillo y tempate, y deben de cumplir los parámetros mostrados en la Tabla 4-1.

Como se mencionó en la sección 4.1.1 la mayor conversión y eficiencia del proceso se logra cuando los AGL son menores del 2%, se presenta el balance de masa teniendo ambos escenarios, cuando el porcentaje de AGL es menor del 2% y cuando es del 4%; el balance se encuentran en las Tablas 4-4 y 4-5 respectivamente.

Se destacan, como corrientes de entrada, el aceite crudo, el agua necesaria para el lavado del mismo, el ácido fosfórico utilizado para precipitar la materia insaponificable, el hidróxido de sodio empleado como catalizador en la conversión de los triglicéridos de los ácidos grasos a sus respectivos ésteres, el metanol principal reactivo en la reacción química principal para la producción de BD y el silicato de magnesio, empleado como sólido de lavado.

En las corrientes de salida, se tiene el producto principal BD y los residuos que se tienen en el proceso, en su mayoría son clasificados como residuos químicos: silicato de magnesio, catalizador (hidróxido de sodio), glicerina, gomas, jabón, sulfato de sodio, fosfato trisódico y agua de proceso, únicamente la cascarilla de las semillas es clasificada como residuo orgánico. Para la realización del balance de materia se tiene en cuenta una base de cálculo de 3000 L de aceite procesado, que corresponde a la cantidad de aceite capaz de procesar una planta de producción de biodiesel en procesos discontinuos y secuenciales, como la utilizada en el Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA).³

³ El detalle del Balance de material se muestra en el Anexo 2.

Tabla 4-4 Balance de materia del proceso productivo de BD sin TEA

Concepto	Unidades	Higuerillo		Tempate		Maní	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Semilla	kg	3,333.33		5,245.9016		9,072.00	
Aceite Crudo	kg	2721.95		2721.95		2721.95	
Agua	kg	345.19	346.47	345.23	346.50	345.51	346.78
Ácido Fosfórico	kg	2.31		2.31		2.31	
Gomas	kg		54.44		54.44		54.44
Hidróxido de Sodio	kg	36.21	26.14	36.22	26.14	36.34	26.14
Fosfato trisodico	kg		3.87		3.87		3.87
Metanol	kg	283.93		284.55		289.22	
Glicerina	kg		277.59		278.19		282.76
Silicato de magnesio	kg	105.01	105.01	104.53	104.53	104.40	104.40
Jabón	kg		55.01		54.79		54.74
Biodiesel	kg		2625.18		2613.33		2609.93
Cascarilla	kg		2,935.32		1,956.72		3,024.00
TOTAL	kg	3494.60	3493.70	3494.79	3481.79	3499.73	3483.06

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-5 Balance de materia del proceso productivo de BD con TEA

Concepto	Unidades	Higuerillo		Tempate		Maní	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Semilla	kg	3,333.33		5,245.9016		9,072.00	
Aceite Crudo	kg	2721.95		2721.95		2721.95	
Agua	kg	345.97	367.79	346.29	368.27	346.01	367.88
Ácido Sulfúrico	kg	37.38		37.38		37.38	
Ácido Fosfórico	kg	2.31		2.31		2.31	
Gomas	kg		54.44		54.44		54.44
Hidróxido de Sodio	kg	58.93	25.61	58.93	25.61	58.93	25.61
Sulfato de Sodio	kg		54.14		54.14		54.14
Fosfato trisodico	kg		3.87		3.87		3.87
Metanol	kg	290.25		295.72		290.94	
Glicerina	kg		266.48		271.45		267.06
Silicato de magnesio	kg	102.86	102.86	102.27	102.27	102.40	102.40
Biodiesel	kg		2683.61		2668.60		2672.09
Cascarilla	kg		2,935.32		1,956.72		3,024.00
TOTAL		3559.66	3558.80	3564.85	3548.63	3559.93	3547.49

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Bioetanol

La producción de BE en El Salvador se realiza por un proceso fermentativo empleando melaza como materia prima, la cual es un subproducto de la producción de azúcar proveniente de la caña de azúcar.

La materia prima del proceso productivo de BE es la melaza, subproducto de la producción de azúcar, se tiene los nutrientes, el vapor y el agua consumida como materia secundaria.

Los residuos propios del proceso de producción de BE son dióxido de carbono emitido durante el proceso fermentativo, vinazas, otros tipos de alcoholes, aceite y flemazas.

Para llevar a cabo el balance de masa⁴ se han considerado una base de cálculo del proceso de 300Ton de melaza ingresando al proceso, además los cálculos son basados en las siguientes relaciones:

$$\frac{0.27-0.3 \text{ Ton melaza}}{\text{Ton azúcar}} \quad (\text{Berrios y Castro, 1998})$$

$$\frac{0.4503 \text{ Ton vapor}}{\text{Ton etanol}} \quad (\text{Tecnología Limpia Colombia, 2014})$$

$$\frac{6-12 \text{ lts etanol}}{\text{Ton azúcar}} \quad (\text{Serrano, 1983})$$

$$\frac{2.7062 \text{ Ton agua}}{\text{Ton melaza esterilizada}} \quad (\text{Tecnologías Limpias Colombia , 2014})$$

⁴ Ver anexo 3 para mayor detalle de balance de material del proceso productivo de BE

$\frac{3.84 \text{ g levadura}}{\text{Its etanol}}$

(Erazo, Cuellar y Vaquerano, 1994)

$\frac{0.006 \text{ Ton alcohol impotable}}{\text{Ton etanol}}$

(Tecnología limpias Colombia, 2014)

$\frac{0.00125 \text{ Ton aceite fassel}}{\text{Ton etanol}}$

(Tecnologías limpias Colombia, 2014)

En la Tabla 4-6 se muestran los valores de las corrientes de entrada y salida al proceso.

Tabla 4-6 Balance de masa de proceso productivo de BE

Concepto	Entrada (Ton)	Salida(Ton)
Melaza	300.00	
Agua (Vapor)	17.49	
Agua para dilución	859.19	
Nutrientes/levaduras	0.19	
Agua en columna hidroselectora	455.86	
Dióxido de carbono (CO ₂)		66.01
Vinazas		957.57
Flemazas de columna concentradora		78.31
Alcohol impotable		0.23
Aceites fassel		0.05
Flemazas de la rectificación		491.72
Etanol 96%		38.84
TOTAL	1632.73	1632.73

Fuente: Elaboración propia

4.3 INVENTARIO DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS

El inventario de proceso, son los consumos reales y globales; de materiales y energía, que se incurren para llevar a cabo la producción de cada uno de los

biocombustibles líquidos, en un 1 año, además de la cuantificación de los residuos producidos en la misma escala de tiempo.

Se diferencia del balance de materia, ya que en este último se realiza una cuadratura de las corrientes sin considerar el tiempo total de producción en un año calendario, sino más bien de la cuantificación según una base de cálculo arbitraria. Se presenta, en base a lo anterior, el inventario de cada uno de los procesos productivos de biocombustibles líquidos en estudio.

4.3.1 Biodiesel

El proceso actual de BD en El Salvador, se lleva a cabo procesando 3000L de aceite crudo por cada 12 horas al día, la producción se desarrolla 5 días a la semana, para un total de 3600 horas de producción anual.

En el consumo de energía, se utiliza energía eléctrica, la cual es tomada del servicio de la red pública.

El inventario del proceso de producción de BD en El Salvador se muestra en las Tablas 4-7, 4-8 y 4-9. En estas se desglosan las entradas y salidas al proceso de materias primas y otras corrientes materiales, consumo de energía eléctrica y residuos para un año de producción.

Tabla 4-7 Inventario de proceso para BD de Higuierillo

INVENTARIO DE PROCESO			
ENTRADAS		Sin TEA	Con TEA
Materias primas	Unidades	Cantidades	Cantidades
Semilla de higuierillo	Ton/año	1000.0	1000.0
Aceite crudo	Ton/año	816.6	816.6
Hidróxido de Sodio	Ton/año	10.9	17.7
Metanol	Ton/año	85.2	87.1
Materias secundarias			

INVENTARIO DE PROCESO			
ENTRADAS		Sin TEA	Con TEA
Ácido Fosfórico	Ton/año	0.7	0.7
Ácido Sulfúrico	Ton/año		11.2
Silicato de Magnesio	Ton/año	31.5	30.9
Agua consumida	m³/año	103.86	104.10
ENTRADAS		Sin TEA	Con TEA
Energía eléctrica⁵			
Proveniente de la red	kWh/año	32246.03	37620.36
SALIDAS		Sin TEA	Con TEA
Productos	Unidades	Cantidades	Cantidades
Biodiesel	Gal/año	205,135.89	209,701.99
Residuos			
Cascarilla	Ton/año	880.6	880.6
Agua de proceso	Ton/año	103.9	110.3
Gomas	Ton/año	16.3	16.3
Fosfato trisodico	Ton/año	1.2	1.2
Glicerina	Ton/año	83.3	79.9
Hidróxido de sodio de proceso	Ton/año	7.8	7.7
Silicato de magnesio de proceso	Ton/año	31.5	30.9
Jabón	Ton/año	16.5	0.0
Sulfato de Sodio	Ton/año	0.0	16.2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-8 Inventario de proceso para BD de Tempate

INVENTARIO DE PROCESO			
ENTRADAS		Sin TEA	Con TEA
Materias primas	Unidades	Cantidades	Cantidades
Semilla de tempate	Ton/año	1573.8	1573.8
Aceite crudo	Ton/año	816.6	816.6
Hidróxido de Sodio	Ton/año	10.9	17.7
Metanol	Ton/año	85.4	87.3

⁵ En el anexo 4 se encuentra detallado el consumo de energía eléctrica del proceso de BD

INVENTARIO DE PROCESO			
ENTRADAS		Sin TEA	Con TEA
Materias secundarias			
Ácido Fosfórico	Ton/año	0.7	0.7
Ácido Sulfúrico	Ton/año	0.0	11.2
Silicato de Magnesio	Ton/año	31.4	30.7
Agua consumida	m³/año	103.88	104.11
Energía eléctrica			
Proveniente de la red	kWh/año	32,246.03	37,620.36
SALIDAS		Sin TEA	Con TEA
Productos	Unidades	Cantidades	Cantidades
Biodiesel	gal/año	215,180.26	220,019.08
Residuos			
Cascarilla	Ton/año	587.0	587.0
Agua de proceso	Ton/año	104.0	110.4
Gomas	Ton/año	16.3	16.3
Fosfato trisodico	Ton/año	1.2	1.2
Glicerina	Ton/año	83.5	80.1
Hidróxido de sodio de proceso	Ton/año	7.8	7.7
Silicato de magnesio de proceso	Ton/año	31.4	30.7
Jabón	Ton/año	16.4	0.0
Sulfato de Sodio	Ton/año	0.0	16.2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-9 Inventario de proceso para BD de Maní

INVENTARIO DE PROCESO			
ENTRADAS		Sin TEA	Con TEA
Materias primas	Unidades	Cantidades	Cantidades
Semilla de maní	Ton/año	2721.6	2721.6
Aceite crudo	Ton/año	816.6	816.6
Hidróxido de Sodio	Ton/año	10.9	17.7
Metanol	Ton/año	86.8	88.7
Materias secundarias		0.0	0.0

INVENTARIO DE PROCESO			
ENTRADAS		Sin TEA	Con TEA
Ácido Fosfórico	Ton/año	0.7	0.7
Ácido Sulfúrico	Ton/año	0.0	11.2
Silicato de Magnesio	Ton/año	31.3	30.7
Agua consumida	m³/año	103.96	104.19
Energía eléctrica			
Proveniente de la red	KWh/año	32,246.03	37,620.36
SALIDAS		Sin TEA	Con TEA
Productos	Unidades	Cantidades	Cantidades
Biodiesel	gal/año	212,953.31	217,740.12
SALIDAS		Sin TEA	Con TEA
Residuos	Unidades	Cantidades	Cantidades
Vaina	Ton/año	907.2	907.2
Agua de proceso	Ton/año	104.0	110.5
Gomas	Ton/año	16.3	16.3
Fosfato trisodico	Ton/año	1.2	1.2
Glicerina	Ton/año	84.8	81.4
Hidróxido de sodio de proceso	Ton/año	7.8	7.7
Silicato de magnesio de proceso	Ton/año	31.3	30.7
Sulfato de Sodio	Ton/año	0.0	16.2
Jabón	Ton/año	16.4	0.0

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Bioetanol

En la producción azúcar en el ingenio La Cabaña; único productor de BE, se procesan 1028,054.49 Toneladas de caña de azúcar, produciendo 247729.94 Toneladas de azúcar y 74318.98 Toneladas de melaza (MAG, 2013), esta cantidad de melaza, es la base del inventario de proceso anual, con una duración en zafra de 180 días, en producción 24 horas al día, con un total de 4320 horas

En cuanto al consumo energético, se tiene que este es por consumo de energía eléctrica proveniente de la red.

Los valores contabilizados de todas estas corrientes se detallan en la Tabla 4-10⁶.

Tabla 4-10 Inventario de producción de BE

INVENTARIO DE PROCESO		
ENTRADAS		
Materias primas	Unidades	Cantidades
Caña de azúcar	Ton/año	1,028,054.05
Melaza	Ton/año	74,318.97
Nutrientes/levaduras	Ton/año	47.37
Materias secundarias		
Agua (Vapor)	Ton/año	4,333.05
Agua consumida	m³/año	117,277.45
Energía		
Energía eléctrica		
Proveniente de la red	kWh/año	8523,360.00
SALIDAS		
Productos	Unidades	Cantidades
Etanol 96%	Ton/año	2,910,488.63
Residuos		
Dióxido de carbono (CO ₂)	Ton/año	16,353.89
Vinazas	Ton/año	237,216.60
Flemazas de columna concentradora	Ton/año	19,401.29
Alcohol impotable	Ton/año	57.74
Aceites fussel	Ton/año	12.03
Flemazas de la rectificación	Ton/año	121,824.23

Fuente: Elaboración propia

⁶ Ver anexo 5, en el cual se encuentra detallado el consumo de energía eléctrica del proceso de producción de BE

4.4 METODOLOGÍA DE HUELLA ECOLÓGICA

La metodología que se aplica al cálculo de la huella ecológica de cada uno de los procesos productivos, se adecua a cada categoría seleccionada para el estudio, las cuales se dividen en tres:

4.4.1 Recursos materiales

La metodología a utilizar será la implementada por Mathis Wackernagel y William Rees, actualmente los trabajos de aplicación de HE toman como base sus estudios. (Saravia, 2010), por ello se tiene los siguientes pasos a desarrollar:

- a) Inventariar los flujos de entrada en cada uno de los procesos productivos de biocombustibles líquidos, agrupándolos en materia prima, secundaria y agua.
- b) Recolección y/o cálculo de índices de productividad en El Salvador.
La productividad natural hace referencia a aquellos productos que se obtiene de forma directa de la tierra, es la superficie necesaria para producir una determinada cantidad de material (Saravia, 2010).
- c) Determinar la superficie biológicamente productiva de los consumos, según la expresión:

$$\text{Área} = \frac{\text{Consumo}}{\text{Rendimiento o índice de productividad}} \quad \text{Ec. 4-1}$$

- d) Distribuir las superficies necesarias en los diferentes tipos de suelos.
- e) Normalizar las superficies biológicamente productivas, empleando los factores de equivalencia presentados en la Tabla 3-5 a través de la siguiente expresión:

$$\text{Huella ecológica} = \frac{\text{Consumo}}{\text{Productividad}} \times \text{Factor de equivalencia} \quad \text{Ec. 4-2}$$

- f) Obtener la huella ecológica total mediante la sumatoria de las huellas ecológicas de las diferentes categorías.

$$HE_{\text{Total}} = \sum_{\text{Categoría}} HE \quad \text{Ec. 4-3}$$

4.4.2 Energía

La evaluación de HE por consumo de energía estará encaminada hacia los diferentes recursos que comprenden los combustibles fósiles, energía eléctrica y energía geotérmica (Tabla 4-11).

Tabla 4-11 División de subcategorías del consumo energético

ENERGIA
1. Combustibles fósiles
Gasolina
Diesel
Gas licuado de petróleo
Fuel oil o Bunker
2. Energía eléctrica
Hidráulica
Geotérmica
Térmica
Biomasa
3. Energía térmica

Fuente: Adaptado de Doménech (2006) y Saravia (2010).

Una vez establecido el inventario con consumo de energía en las diferentes categorías, se procede a aplicar la metodología adecuada para cada corriente:

C. Combustibles fósiles.

- o Expresar el consumo de combustible fósil en gigajulios aplicando la siguiente expresión:

Consumo (gigajulios) = Consumo (toneladas) × Intensidad Energética (gigajulios/toneladas)

Ec. 4-4

- A través de productividad energética, expresada en (gigajulios/hectárea) se procede a conocer el área productiva. (Doménech, 2006).
- Aplicar los literales del d) en delante de la metodología de HE por consumos materiales.

D. Energía eléctrica.

- Conocer matriz de producción de energía eléctrica en El Salvador
- El consumo de energía eléctrica en kWh/año, transformarlos a julios, utilizando las conversiones que se presentan en la Tabla 4-12:

Tabla 4-12 Factores de conversión para energía eléctrica

Factor de conversión	Tipo de energía asociada
1 kWh = 3.6 Mj = 0.0036 Gj	Aplicable para energías renovables y nuclear
1 kWh = 0.0120 Gj	Aplicable para centrales térmica de carbón y combustibles fósiles.

Fuente: Doménech (2006).

- A través de productividad energética, expresada en (gigajulios/hectárea) se procede a conocer el área productiva. (Doménech, 2006).

Tabla 4-13 Productividad energética para energía renovable

Energía renovable	Productividad energética (Gj/ha/año)
Hidroeléctrica	
Presas ubicadas en altas altitudes	15000
Presas de bajas altitudes	160 a 480
Eólica	60000
Solar fotovoltaica	1500

Fuente: Doménech (2006).

Para el caso de la energía geotérmica, el consumo energético expresado en GWh, es transformado en superficie a través de la productividad (Tabla 4-14)

Tabla 4-14 Productividad de energía geotérmica

Tecnología	Tierra en uso m ² /MW	Tierra en uso m ² /GWh
110 MW Planta geotérmica flash (excluyendo pozos)	1260	160
20 MW Planta geotérmica binaria (excluyendo pozos)	1415	170

Fuente: Anderson (2006)

En El Salvador se cuenta con 5 unidades de generación de energía eléctrica y 2 plantas de ciclo binario, distribuidas en la central y campo geotérmico de Berlín, Usulután se tienen 3 flash simple y 1 ciclo combinado; y en Ahuachapán: 2 simples y 1 ciclo combinado. (LaGeo, 2013).

La energía proveniente de centrales simples representa el 71% de toda la energía geotérmica y el 29% por centrales de ciclo combinado, por lo que la productividad energética para el recurso geotérmico salvadoreño es la siguiente:

$$\text{Productividad energética} = \frac{\left(\frac{160\text{m}^2}{\text{GWh}} \times 71\%\right) + \left(\frac{170\text{m}^2}{\text{GWh}} \times 29\%\right)}{1,000,000 \text{ kWh}} = 0.000163 \frac{\text{m}^2}{\text{kWh}}$$

- Realizar la asignación de terreno para cada flujo de consumo de energía eléctrica, según lo que se presenta en la Tabla 4-15:

Tabla 4-15 Tipos de terrenos para energía eléctrica

Energía eléctrica generada por:	Tipo de terreno asignado
Combustibles fósiles	Energía fósil
Hidráulicas (altas altitudes)	Pastos
Hidráulicas (bajas altitudes)	Cultivos
Fotovoltaica	Cultivos

Fuente: Doménech (2006).

- Aplicar los literales del d) en delante de la metodología de HE por consumos materiales.

E. Residuos⁷

En el proceso productivo de BD y BE, se tiene que los residuos generados son no reciclables.

El procedimiento llevado a cabo, se desglosa en los siguientes pasos (Doménech, 2008):

- Cuantificación de los residuos generados en cada uno de los procesos de producción; expresados en toneladas.
- Multiplicar cada residuo, expresado en toneladas, con los índices de conversión de residuos y vertidos mostrados en la Tabla 4-17 cuyas unidades son hectáreas/tonedadas.

En la producción de BE se tiene como flujo de salida la emisión de CO₂ biogenico; el procedimiento para la evaluación de la HE es el siguiente (Doménech, 2008):

- Cuantificación de emisión de CO₂, expresado en Toneladas
- Asignación de terreno de bosques de captación de CO₂
- Multiplicar por el factor de absorción de CO₂ (Tabla 4-16).

Tabla 4-16 Factores de absorción de CO₂

Factor de absorción (tCO₂/ha)							
	Bosques para CO₂	Superficie cultivable	Pastos	Bosques	Superficie construida	Mar	Aguas continentales
Tasa	3.67	1.98	0.84	3.67	1.98	0.24	0.24

Fuente: Doménech (2008)

⁷ En el anexo 8 se presenta una propuesta de metodología de cálculo de HE para residuos, en la cual se puede llegar a implementar datos del MINEC.

Tabla 4-17 Matriz re residuos y vertidos

Residuos	Matriz de residuos y vertidos (índices de conversión) (Ha/Ton)					
	Bosques para CO2	Tierra cultivable	Pastos	Bosque	Terreno Construido	Mar
Residuos no peligrosos						
Residuos urbanos y asimilables (verted.)	0.001460	0.0	0.0000000605	0.0000256	0.0001680	0.0
Residuos urbanos y asimilables (inciner.)						
Orgánicos (alimentos)	0.002420	0.0	0.0000003260	0.0002470	0.0003180	0.0
Residuos peligrosos						
Aceites usados	0.045100	0.0	0.0000044800	0.0001940	0.0000734	0.0
Emulsiones agua/aceite	0.105000	0.0	0.0000262000	0.0000581	0.0001330	0.0
Ácidos alcalinos o salinos	0.035400	0.0	0.0000038000	0.0018100	0.0049000	0.0
Filtros de aceite	0.744000	0.0	0.0000986000	0.0094600	0.0005660	0.0
Absorbentes usados	0.241000	0.0	0.0000305000	0.0039000	0.0037600	0.0
Pinturas, barnices, alquitranes, químicos	0.053700	0.0	0.0000043200	0.0006740	0.0051800	0.0
Disolventes	0.033900	0.0	0.0000007030	0.0015100	0.0002650	0.0
Vertidos						
Vertidos a red (con EDAR al mar)	0.0000797	0.0	0.0000000181	0.00000141	0.0000236	0.0
Vertidos a red (con EDAR a río)	0.0000797	0.0	0.0000000181	0.00000141	0.0000236	0.0

Fuente: Domenech (2008).

4.5 DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO

Toda la información a utilizar para el cálculo de HE, fue recolectada en una hoja de cálculo de Microsoft Excel 2013, se divide en las categorías de análisis de HE las cuales son⁸:

4.5.1 Hoja de cálculo para materiales

La hoja de cálculo de consumo de materiales, para el caso del BD, está dividida para un proceso sin TEA y uno con TEA, además los consumos se subdividen según el tipo de aceite base para la producción: Higuerrillo, maní y tempate. Para el caso de BE, se presentan los diferentes insumos que son consumidos para la producción a través de melaza.

Luego de establecer el inventario de proceso de BD, se procede a ingresar los datos en la columna 3, de la Tabla 4-18, en las unidades mostradas en la columna 4, de igual forma para el proceso de BE, según la Figura 4-22.

En la columna 9 de la Tabla 4-18 y de la Tabla 4-22, se tiene una lista desplegable de terrenos, en la cual se selecciona la correspondiente a cada consumo de materiales, una vez seleccionado el tipo de terreno, automáticamente y haciendo usos de los factores de equivalencia e índices de producción se despliega el valor de área productiva y huella ecológica, para cada uno de los consumos ingresados, y se le asigna cero al área productiva y huella ecológica del resto de terrenos no seleccionados.

En la parte inferior de ambas tablas, se contabiliza la huella ecológica según el tipo de terreno para cada tipo de aceite utilizado en el proceso y para la melaza. (Tabla 4-19 y Tabla 4-22).

⁸ En el anexo 7, se muestra la hoja de cálculo de HE con la introducción de datos y los resultados obtenidos.

En la Tabla 4-20 y Tabla 4-21, se muestran las columnas finales de la hoja de cálculo de consumo de materiales para la producción de BD y BE, respectivamente, en la cual se calcula el área productiva y huella ecológica para cada uno de los consumos, para que en la parte inferior desplegar el área productiva y huella ecológica total.

Tabla 4-18 Hoja de cálculo de HE para consumo de materiales en la producción de BD PARTE 1

Origen	Insumos	Cantidades Entrantes	Unidades	Índice de Productividad (TON/Hec)	Índice de Productividad (m3/Hec)	Intensidad Energética (GJ/ton)	Factor de emisión (tCO2/Gj)	Seleccionar Tipo de Área Productiva
Higuerillo	Semilla de Higuerillo		Ton	1.2				Tierras de Cultivo
	Hidróxido de Sodio		Ton			40.0	0.0737	Bosques de CO2
	Metanol		Ton			40.0	0.0737	Bosques de CO2
	Ácido Fosfórico		Ton			40.0	0.0737	Bosques de CO2
	Ácido Sulfúrico		Ton			40.0	0.0737	Bosques de CO2
	Agua consumida		m ³		2016000.0			Agua marina y Continental
	Silicato de Magnesio		Ton			40.0	0.0737	Bosques de CO2
Maní	Semilla de maní		Ton	3.2				Tierras de Cultivo
	Hidróxido de Sodio		Ton			40.0	0.0737	Bosques de CO2
	Metanol		Ton			40.0	0.0737	Bosques de CO2
	Ácido Fosfórico		Ton			40.0	0.0737	Bosques de CO2
	Ácido Sulfúrico		Ton			40.0	0.0737	Bosques de CO2
	Agua consumida		m ³		2016000.0			Agua marina y Continental
	Silicato de Magnesio		Ton			40.0	0.0737	Bosques de CO2
Tempate	Semilla de tempate		Ton	5.0				Tierras de Cultivo
	Hidróxido de Sodio		Ton			40.0	0.0737	Bosques de CO2
	Metanol		Ton			40.0	0.0737	Bosques de CO2
	Ácido Fosfórico		Ton			40.0	0.0737	Bosques de CO2
	Ácido Sulfúrico		Ton			40.0	0.0737	Bosques de CO2
	Agua consumida		m ³		2016000.0			Agua marina y Continental
	Silicato de Magnesio		Ton			40.0	0.0737	Bosques de CO2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-19 Hoja de cálculo de HE para consumo de materiales en la producción de BD PARTE 2

Origen	Insumos	Tipo de Área													
		Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua Marina y Continental		Superficie construida		Tierra urbanizada		Bosques para CO2	
		Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	tCO2	H.E
Higuerillo	Semilla de Higuerillo														
	Hidróxido de Sodio														
	Metanol														
	Ácido Fosfórico														
	Ácido Sulfúrico														
	Agua consumida														
	Silicato de Magnesio														
Maní	Semilla de maní														
	Hidróxido de Sodio														
	Metanol														
	Ácido Fosfórico														
	Ácido Sulfúrico														
	Agua consumida														
	Silicato de Magnesio														
Tempate	Semilla de tempate														
	Hidróxido de Sodio														
	Metanol														
	Ácido Fosfórico														
	Ácido Sulfúrico														

Origen	Insumos	Tipo de Área													
		Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua Marina y Continental		Superficie construida		Tierra urbanizada		Bosques para CO2	
		Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	tCO2	H.E
	Agua consumida														
Origen	Insumos	Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua Marina y Continental		Superficie construida		Tierra urbanizada		Bosques para CO2	
		Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	tCO2	H.E
Tempate	Silicato de Magnesio														
	Huella ecológica por tipo de tierra	Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua marina y Continental		Superficie Construida		Tierra Urbanizada		Bosques para CO2	
	Higuerillo														
	Maní														
	Tempate														

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-20 Hoja de cálculo de HE para consumo de materiales en la producción de BD PARTE 2

Origen	Insumos	Área productiva (Ha)	tCO2	HE TOTAL por Tipo de insumo (Hag)
Higuerillo	Semilla de Higuerillo			
	Hidróxido de Sodio			
	Metanol			
	Ácido Fosfórico			
	Ácido Sulfúrico			
	Agua consumida			
	Silicato de Magnesio			

Origen	Insumos	Área productiva (Ha)	tCO2	HE TOTAL por Tipo de insumo (Hag)
Maní	Semilla de maní			
	Hidróxido de Sodio			
	Metanol			
	Ácido Fosfórico			
	Ácido Sulfúrico			
	Agua consumida			
	Silicato de Magnesio			
Tempate	Semilla de tempate			
Origen	Insumos	Área productiva (Ha)	tCO2	HE TOTAL por Tipo de insumo (Hag)
Tempate	Hidróxido de Sodio			
	Metanol			
	Ácido Fosfórico			
	Ácido Sulfúrico			
	Agua consumida			
	Silicato de Magnesio			
			Área Productiva Total Producción BD (Ha)	tCO2
	Higuerillo			
	Maní			
	Tempate			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-21 Hoja de cálculo de HE para consumo de materiales en la producción de BE PARTE 1

Materias Primas e Insumos	Insumos	Cantidades Entrantes	Unidades	Índice de Productividad	Índice de Productividad (m³/Hec)	Intensidad Energética (GJ/ton)	Factor de emisión (tCO2/Gj)	Área Productiva
Etanol a partir de Melaza	Caña de azúcar							Tierras de Cultivo
	Nutrientes/levaduras							Bosques de CO2
	Agua							Agua marina y Continental

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-22 Hoja de cálculo de HE para consumo de materiales en la producción de BE PARTE 2

Materias Primas e Insumos		Tipo de Área													
		Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua Marina y Continental		Superficie construida		Tierra urbanizada		Bosques para CO2	
		Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	tCO2	H.E
Etanol a partir de Melaza	Caña de azúcar														
	Nutrientes/levaduras														
	Agua														
		Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua marina y Continental		Superficie Construida		Tierra Urbanizada		Bosques para CO2	
	Área Productiva Total para:														

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-23 Hoja de cálculo de HE para consumo de materiales en la producción de BE PARTE 3

Materias Primas e Insumos	Insumos	Área productiva (Ha)	tCO₂	HE TOTAL por Tipo de insumo (Hag)
Etanol a partir de Melaza	Caña de azúcar			
	Nutrientes/levaduras			
	Agua			
		Área Productiva Total Producción Bioetanol (Ha)	tCO₂	H.E. Total de insumos BE (Hag)

Fuente: Elaboración propia

4.5.2 Hoja de cálculo para energía

Para el caso del cálculo de HE para energía una vez establecido el consumo total en cada proceso productivo, y teniendo en cuenta que en ambos procesos el consumo es por energía eléctrica (Tabla A7-1 del Anexo 7); se pondera el consumo para cada recurso según la matriz energética de producción de energía en El Salvador, cuyo resultado se expresa en la columna 2 de las tablas 4-24 y 4-27, para BD y BE respectivamente, según las unidades de la columna 3 de las mismas tablas.

El consumo es expresado en GJ/ año para energía de recurso hidráulico, térmico y biomasa, para ser multiplicados por la intensidad energética y factor de emisión de CO₂ para el caso de biomasa y térmica; para la energía geotérmica se hace uso de la productividad y de esta manera conocer directamente el área productiva. Estos datos son expresados en las columnas 5, 6, 7 y 8 de las Tabla 4-24 y 4-25.

Luego, a través de la lista desplegable de la columna 3 de las tablas Tabla 4-25 y 4-28 se multiplica por el factor de equivalencia para conocer la HE de cada consumo de energía y asignar cero a los restantes tipos de terrenos. En las Tabla 4-26 y Tabla 4-29 se despliegan los resultados globales de HE por tipo de energía eléctrica y de forma global por tipo de aceite y para la melaza un único valor.

Tabla 4-24 Hoja de cálculo de HE para consumo de energía en la producción de BD PARTE 1

Origen	Tipo de energía	Consumos	Unidades	Consumo en Gj/año	Productividad energética m²/GWh	Intensidad energética (Gj/ha/año)	Factor de emisión (tCO₂/Gj)
Higuerillo	Hidráulica		kWh/año			15000.000	
	Geotérmica		kWh/año		0.000163		
	Biomasa		kWh/año			0.031	0.112
	Térmica		kWh/año			0.027	0.097
Maní	Hidráulica		kWh/año			15000.000	
	Geotérmica		kWh/año		0.000163		
	Biomasa		kWh/año			0.031	0.112
	Térmica		kWh/año			0.027	0.097
Tempate	Hidráulica		kWh/año			15000.000	
	Geotérmica		kWh/año		0.000163		
	Biomasa		kWh/año			0.031	0.112
	Térmica		kWh/año			0.027	0.097

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-25 Hoja de cálculo de HE para consumo de energía en la producción de BD PARTE 2

Origen	Tipo de energía	Seleccionar Tipo de Área Productiva	Tipo de Área													
			Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua Marina y Continental		Superficie construida		Tierra Urbanizada		Bosques para CO2	
			Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	tCO2	H.E
Higuerillo	Hidráulica	Tierras de Pastoreo														
	Geotérmica	Tierras de Pastoreo														
	Biomasa	Bosques para CO2														
	Térmica	Bosques para CO2														
Maní	Hidráulica	Tierras de Pastoreo														
	Geotérmica	Tierras de Pastoreo														
	Biomasa	Bosques para CO2														
	Térmica	Bosques para CO2														
Tempate	Hidráulica	Tierras de Pastoreo														
	Geotérmica	Tierras de Pastoreo														
	Biomasa	Bosques para CO2														
	Térmica	Bosques para CO2														
		Huella ecológica por tipo de tierra	Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua marina y Continental	Superficie Construida	Tierra Urbanizada	Bosques para CO2							
		Higuerillo														
		Maní														
		Tempate														

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-26 Hoja de cálculo de HE para consumo de energía en la producción de BD PARTE 3

Origen	Tipo de energía	Área productiva (Ha)	tCO₂	HE TOTAL por Tipo de energía (Hag)
Higuerillo	Hidráulica	0.000	0.00	0.000
	Geotérmica	0.000	0.00	0.000
	Biomasa	0.000	0.000	0.000
	Térmica	0.000	0.000	0.000
Maní	Hidráulica	0.000	0.00	0.000
	Geotérmica	0.000	0.00	0.000
	Biomasa	0.000	0.000	0.000
	Térmica	0.000	0.000	0.000
Tempate	Hidráulica	0.000	0.00	0.000
	Geotérmica	0.000	0.00	0.000
	Biomasa	0.000	0.000	0.000
	Térmica	0.000	0.000	0.000
		Área Productiva Total Producción Biodiesel (Ha)	tCO₂	H.E. Total de energía BD (Hag)
	Higuerillo			
	Maní			
	Tempate			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-27 Hoja de cálculo de HE para consumo de energía en la producción de BE PARTE 1

Origen	Tipo de energía	Consumos	Unidades	Consumo en Gj/año	Productividad energética m ² /GWh	Intensidad energética (Gj/ha/año)	Factor de emisión (tCO ₂ /Gj)
Bioetanol	Hidráulica		kWh/año			15000.000	
	Geotérmica		kWh/año		0.000163		
	Biomasa		kWh/año				0.112
	Térmica		kWh/año				0.097

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-28 Hoja de cálculo de HE para consumo de energía en la producción de BE PARTE 2

Origen	Tipo de energía	Seleccionar Tipo de Área Productiva	Tipo de Área														
			Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua Marina y Continental		Superficie construida		Tierra Urbanizada		Bosques para CO2		
			Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	tCO2	H.E	
Bioetanol	Hidráulica	Tierras de Pastoreo															
	Geotérmica	Tierras de Pastoreo															
	Biomasa	Bosques para CO2															
	Térmica	Bosques para CO2															
			Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua marina y Continental	Superficie Construida	Tierra Urbanizada	Bosques para CO2								
Huella ecológica por tipo de tierra																	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-29 Hoja de cálculo de HE para consumo de energía en la producción de BE PARTE 3

Origen	Tipo de energía	Área productiva (Ha)	tCO₂	Huella Ecológica global por Tipo de energía (Hag)
Bioetanol	Hidráulica			
	Geotérmica			
	Biomasa			
	Térmica			
		Área Productiva Total (Ha)	tCO₂	H.E. Total de BE (Hag)
		0.00		

Fuente: Elaboración propia

4.5.3 Hoja de cálculo para residuos

Para los residuos de cada uno de los procesos, se realiza la contabilización anual de la generación de los mismos, para ser ingresados en la columna 3 de las Tabla 4-30 y Tabla 4-32, para BD y BE, respectivamente, en las unidades mostradas en la columna 4 de las mismas.

Luego son multiplicados por los factores de conversión de residuos y vertidos, para cada uno de los terrenos productivos, para mostrar en las Tabla 4-31 y Tabla 4-33 la HE de cada residuo, para cada tipo de terreo y de forma total para el proceso productivo tanto de BD como de BE según su materia prima base.

Tabla 4-30 Hoja de cálculo de HE para residuos en la producción de BD PARTE 1

Origen	Insumos	Cantidades Generadas	Unidades
Higuerillo	Cascarilla		Ton
	Agua de proceso		Ton
	Gomas		Ton
	Fosfato trisodico		Ton
	Glicerina		Ton
	Hidróxido de sodio de proceso		Ton
	Silicato de magnesio de proceso		Ton
	Jabón		Ton
	Sulfato de Sodio		Ton
Maní	Cascarilla		Ton
	Agua de proceso		Ton
	Gomas		Ton
	Fosfato trisodico		Ton
	Glicerina		Ton
	Hidróxido de sodio de proceso		Ton
	Silicato de magnesio de proceso		Ton
	Jabón		Ton
	Sulfato de Sodio		Ton
Tempate	Cascarilla		Ton
	Agua de proceso		Ton
	Gomas		Ton
	Fosfato trisodico		Ton
	Glicerina		Ton
	Hidróxido de sodio de proceso		Ton
	Silicato de magnesio de proceso		Ton
	Jabón		Ton
	Sulfato de Sodio		Ton

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-31 Hoja de cálculo de HE para residuos en la producción de BD PARTE 2

Origen	Insumos	Tipo de Área							HE TOTAL por Tipo de residuo (Hag)
		Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua Marina y Continental	Superficie construida	Tierra urbanizada	Bosques de CO ₂	
		HE	HE	HE	HE	HE	HE	H.E	
Higuerillo	Cascarilla								
	Agua de proceso								
	Gomas								
	Fosfato trisodico								
	Glicerina								
	Hidróxido de sodio de proceso								
	Silicato de magnesio de proceso								
	Jabón								
	Sulfato de Sodio								
Maní	Cascarilla								
	Agua de proceso								
	Gomas								
	Fosfato trisodico								
	Glicerina								
	Hidróxido de sodio de proceso								
	Silicato de magnesio de proceso								
	Jabón								
	Sulfato de Sodio								

Origen	Insumos	Tipo de Área							HE TOTAL por Tipo de residuo (Hag)
		Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua Marina y Continental	Superficie construida	Tierra urbanizada	Bosques de CO ₂	
		HE	HE	HE	HE	HE	HE	H.E	
Tempate	Cascarilla								
	Agua de proceso								
	Gomas								
	Fosfato trisodico								
	Glicerina								
	Hidróxido de sodio de proceso								
	Silicato de magnesio de proceso								
	Jabón								
	Sulfato de Sodio								

HE por tipo de tierra	Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua marina y Continental	Superficie Construida	Tierra Urbanizada	Bosques para CO ₂		H.E. Total Producción BD
Higuerillo								Higuerillo	
Maní								Maní	
Tempate								Tempate	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-32 Hoja de cálculo de HE para residuos en la producción de BE PARTE 1

Materias Primas e Insumos	Residuos	Cantidades Generadas	Unidades
Residuo	Vinazas		Ton
	Flemazas de columna concentradora		Ton
	Alcohol imponible		Ton
	Aceites fússel		Ton
	Flemazas de la rectificación		Ton
Emisiones	Dióxido de Carbono		Ton

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-33 Hoja de cálculo de HE para residuos en la producción de BE PARTE 2

Materias Primas e Insumos	Residuos	Tipo de Área							HE global por Tipo de residuo (Hag)
		Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua Marina y Continental	Superficie construida	Tierra Urbanizada	Bosques de CO2	
		HE	HE	HE	HE	HE	HE	H.E	
Residuo	Vinazas								
	Flemazas de columna concentradora								
	Alcohol imponible								
	Aceites fússel								
	Flemazas de la rectificación								

Materias Primas e Insumos	Residuos	Tipo de Área							HE global por Tipo de residuo (Hag)
		Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua Marina y Continental	Superficie construida	Tierra Urbanizada	Bosques de CO2	
		HE	HE	HE	HE	HE	HE	H.E	
Emisiones	Dióxido de Carbono								
	Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua marina y Continental	Superficie Construida	Tierra Urbanizada	Bosques para CO2		H.E. Total Producción BE
Residuos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Residuos	0.00
Emisiones	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Emisiones	0.00
									0.00

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5 RESULTADOS

Los resultados obtenidos se presentan en unidades de hectáreas globales para luego realizar el desglose según las diferentes categorías de análisis, finalmente se presenta en términos de huella ecológica específica, es decir, hectáreas globales por biocombustible líquido producido.

Se presenta el resultado de HE para diferentes escenarios de producción de BD y BE que logren satisfacer la demanda de El Salvador.

5.1 HUELLA ECOLÓGICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN EL SALVADOR

El cálculo de la huella ecológica del proceso productivo de BD se realizó con base en la capacidad total de la única planta productora de BD en El Salvador, propiedad del CENTA, para efecto de esta determinación se considera que ésta tiene una eficiencia del 100%, la cual tiene una capacidad de procesar 3000L de aceite en 12 horas.

Se presentan dos escenarios de desarrollo, uno en el cual los aceites son de alta calidad, es decir de bajo porcentaje de ácidos grasos libres (menor del 2%) y otro en el cual estos últimos son elevados (4% en adelante), ambos a partir de tres tipos de aceites: higuierillo, tempate y maní, dando los siguientes resultados.

- Ver Tabla 5-1 donde se presentan los valores de la huella ecológica total para el proceso productivo de BD sin TEA a partir de aceite de higuierillo, maní y tempate respectivamente.

Tabla 5-1 Huella ecológica total para el proceso productivo de BD sin TEA

Materia prima	Galones de BD	Huella Ecología Total (gHa)
Higuerillo	205135.89	2228.00
Maní	212953.31	2242.45
Tempate	215180.26	925.50

Fuente: Elaboración propia.

- Ver Tabla 5-2 donde se presentan los valores de la huella ecológica total para el proceso productivo de BD con TEA a partir de aceite de higuerillo, maní y tempate respectivamente.

Tabla 5-2 Huella ecológica total para el proceso productivo de BD con TEA

Materia prima	Galones de BD	Huella Ecología Total (gHa)
Higuerillo	209701.99	2246.16
Maní	217740.12	2260.62
Tempate	220019.08	943.67

Fuente: Elaboración propia.

Para la conversión de cantidades máxicas a volumétricas se ha empleado la densidad del biodiesel dependiendo de la materia prima, para el caso de higuerillo es de 0.922g/ml (Ramezani, 2010), para maní 0.883kg/l (Singh, 2009) y tempate de 0.875g/cm³ (Balat, 2010)

5.2 HUELLA ECOLÓGICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL EN EL SALVADOR

Actualmente en El Salvador se está produciendo 2, 910,488.63 galones/año de BE, correspondiente a una huella total de 7,809.42gHa. El cálculo se basó en que el BE es obtenido como subproducto de la producción de azúcar proveniente de la caña, la cual presenta una productividad natural de 7.23% respecto a toda la caña procesada en un periodo de zafra, a la vez se pondera el consumo energético previo para la obtención de la melaza.

5.3 HUELLA ECOLÓGICA SEGÚN EL TIPO DE FLUJO: MATERIALES, ENERGÍA Y RESIDUOS

En los presentes apartados, se muestra la HE según las categorías de análisis, es decir, la HE de consumo de materiales, energía y residuos para la producción de biocombustibles líquidos.

5.3.1 Huella ecológica de materiales

La HE de consumos de materiales está constituida por el consumo de materiales primarios, agua y materiales secundarios necesario para la producción de cada biocombustible líquido.

a) Biodiesel.

Para el proceso productivo de biodiesel, la materia prima corresponde a cada una de las semillas requeridas para la extracción de aceites (semillas de higuierillo, maní y tempate), la materia secundaria constituye los reactivos requeridos para la transformación de aceites a BD (Hidróxido de Sodio, Metanol, Ácido fosfórico y Silicato de Magnesio).

▪ Biodiesel sin TEA.

Se presenta en la Tabla 5-3 la HE de consumos de materiales según el tipo de aceite base para la producción de BD sin TEA:

Tabla 5-3 Huella ecológica de consumos para BD sin TEA

Materia prima	H.E de consumos materiales (gHa)
Higuierillo	2210.17
Maní	2224.53
Tempate	908.59

Fuente: Elaboración propia

Para el caso del BD proveniente del aceite de higuerrillo y de maní el 95.3% de la huella de consumos materiales depende del consumo de la materia prima, en el caso del aceite de tempate es de 88.5%.

El consumo de materiales secundarios dentro de la huella ecológica total de consumos materiales representan un 4.7%, para el BD proveniente de aceite de higuerrillo y de maní y de 11.5% para el caso del aceite de tempate.

En cuanto al consumo de agua, el aporte de este dentro de la HE de consumos materiales es prácticamente nulo (0.000001%).

La incidencia de cada rubro de consumos dentro de la HE se representa en la Figura 5-1, en la cual el eje secundario corresponde a la HE por el consumo de agua.

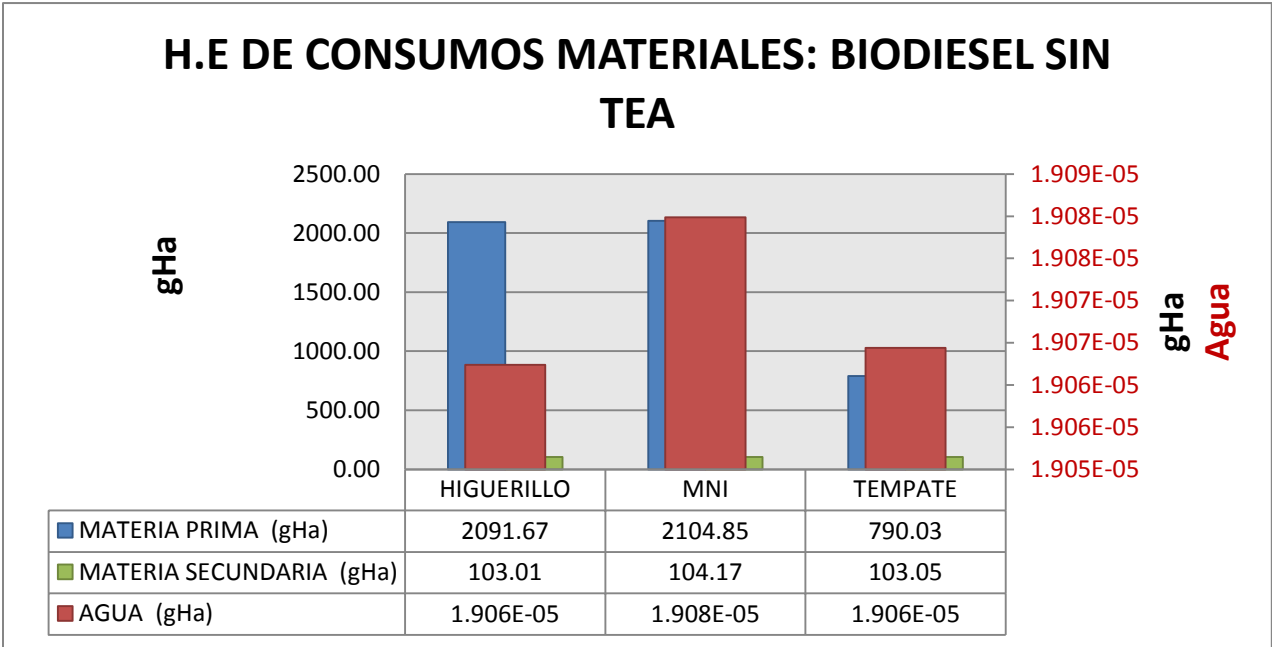


Figura 5-1 Huella ecológica para consumos materiales en la producción de BD sin TEA

Fuente: Elaboración propia

- **Biodiesel con TEA.**

En la Tabla 5-4, se muestra la HE de consumos según el tipo de aceite base para la producción de BD con TEA:

Tabla 5-4 Huella ecológica de consumos para BD con TEA

Materia prima	H.E de consumo de materiales (gHa)
Higuerillo	2210.17
Maní	2224.53
Tempate	908.59

Fuente: Elaboración propia

Para la HE de consumos en el proceso productivo de BD con TEA, se tiene que el consumo de materia prima representa el 94.6% tanto para el BD proveniente de higuerillo como para el de maní, en el caso del BD proveniente del aceite de tempate el consumo de materia prima representa el 87% de la HE de consumos materiales.

El consumo de materia secundaria representa el 5.4%, 5.4% y el 13.00% para la HE de consumo materiales del proceso productivo de BD proveniente de higuerillo, maní y tempate respectivamente.

El consumo de agua dentro de la HE de consumos es prácticamente nula para los tres casos (0.0001%).

En la Figura 5-2, se aprecia la constitución de la HE de consumos materiales en el proceso productivo de BD con TEA, dentro de la cual, el eje secundario corresponde a la huella ecológica global por el consumo de agua.

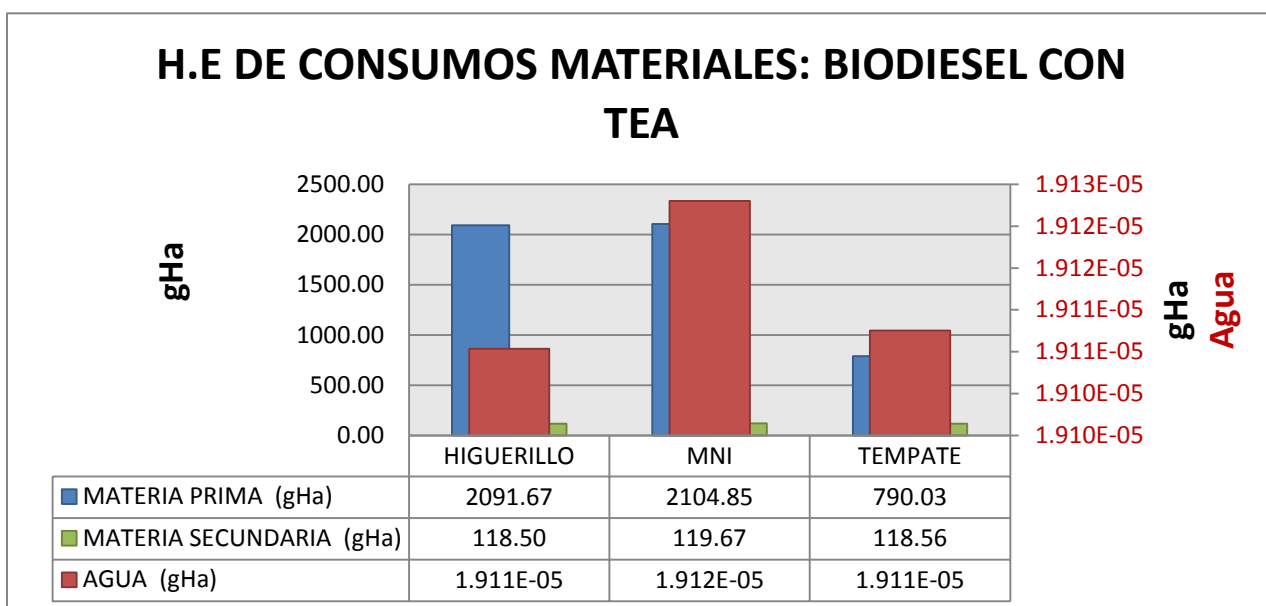


Figura 5-2 Huella ecológica para consumos materiales en la producción de BD con TEA.

Fuente: Elaboración propia

b) Bioetanol.

La HE de consumos para el proceso productivo de BE es de 1,948.17 gHa, la cual está constituida por el consumo de materia prima, es decir, consumo de caña de azúcar la cual representa el 98.1% de la HE de consumos materiales, además del consumo de materia secundaria, como lo son las levaduras y nutrientes, las cuales constituyen el 1.9% de la HE de consumos y el impacto del consumo de agua es prácticamente nulo (0.001%). Ver Figura 5-3, en la cual se presenta el impacto de consumo de cada materia en la HE de consumos del proceso.

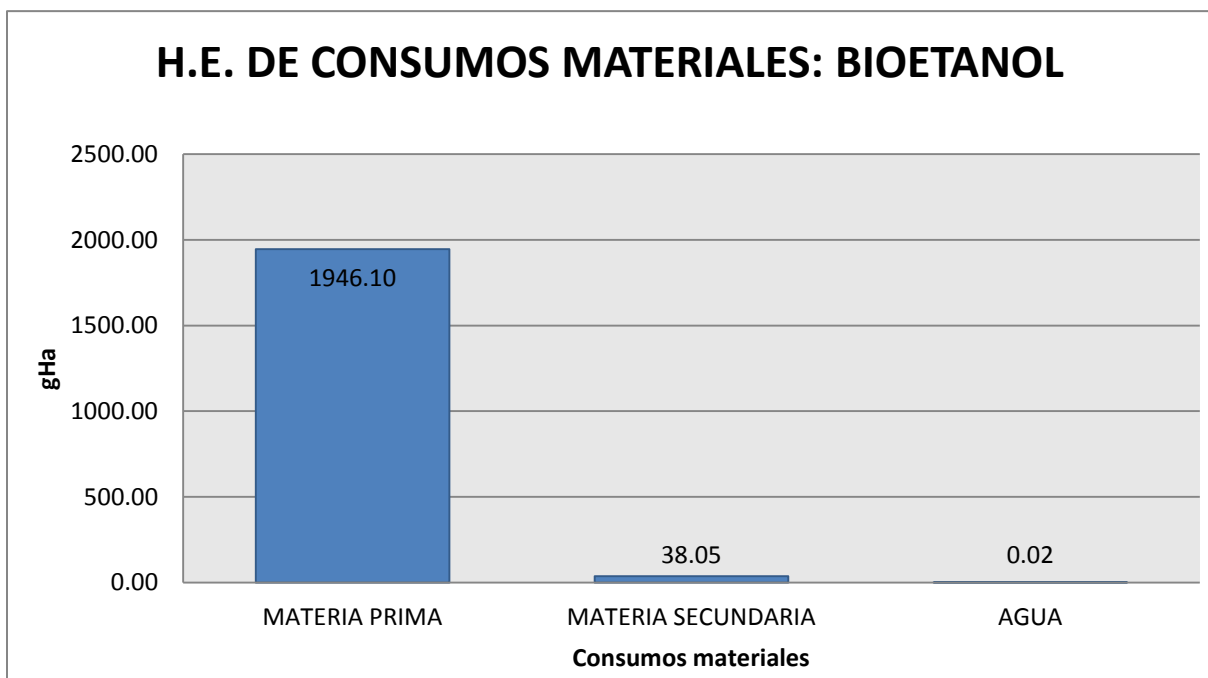


Figura 5-3 Huella ecológica para consumos en la producción de BE.

Fuente: Elaboración propia

5.3.2 Huella ecológica de energía

La HE de energía tanto para el proceso productivo de BD (con y sin TEA) como para el de BE está constituida al 100% del consumo de energía eléctrica, la cual a su vez, según la matriz energética actual de El Salvador está constituida por un 49% de energía proveniente de recurso térmico, 31% de recurso hidráulico, 13% de recurso geotérmico y el 7% de biomasa. (CNE, 2014).

a) Biodiesel.

La HE proveniente por el consumo energético para el proceso productivo de BD sin TEA, independiente del tipo de aceite empleado es de 16.26 gHa y de 18.97 gHa para el proceso productivo con TEA, la cual a su vez, ambas, tienen un porcentaje de 93.02% por energía de recurso térmico, el 4.94% de biomasa, 1.98% de recurso geotérmico y el 0.07% de energía de recurso hidráulico.

La HE del consumo energético está representada, según la matriz energética salvadoreña, en la Figura 5-4.

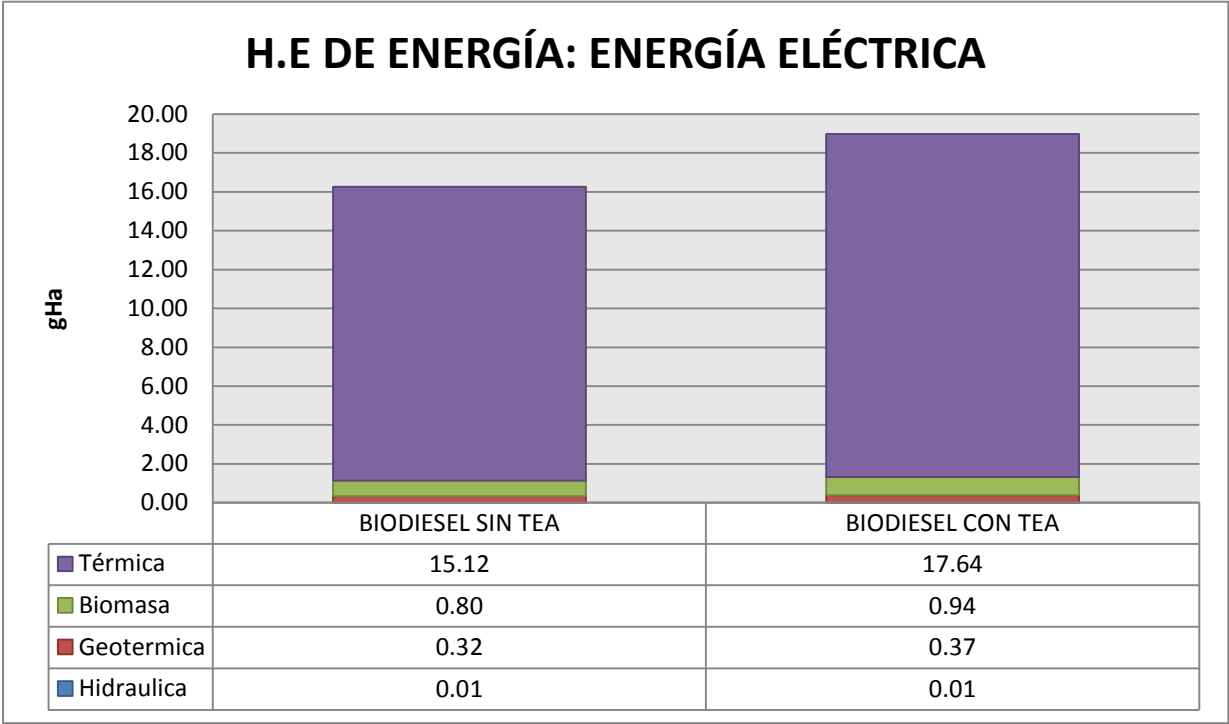


Figura 5-4 Huella ecológica de energía en la producción de BD sin TEA

Fuente: Elaboración propia

b) Bioetanol.

La HE de energía en el proceso productivo de BE en El Salvador, tiene un valor de 1,329.51 gHa y está constituida por el consumo de energía eléctrica propio de la producción de BE como la energía ponderada dentro del proceso de producción de azúcar para producir melaza (7.23% de la energía total consumida hasta la obtención de la melaza), la cual está representada en la Figura 5-5.

Dicha HE del consumo de energía está constituida en un 85% de la energía eléctrica proveniente del recurso térmico, un 13% de la energía proveniente de la biomasa, un 2% de la geotérmica y el 0.01% por la energía hidráulica.

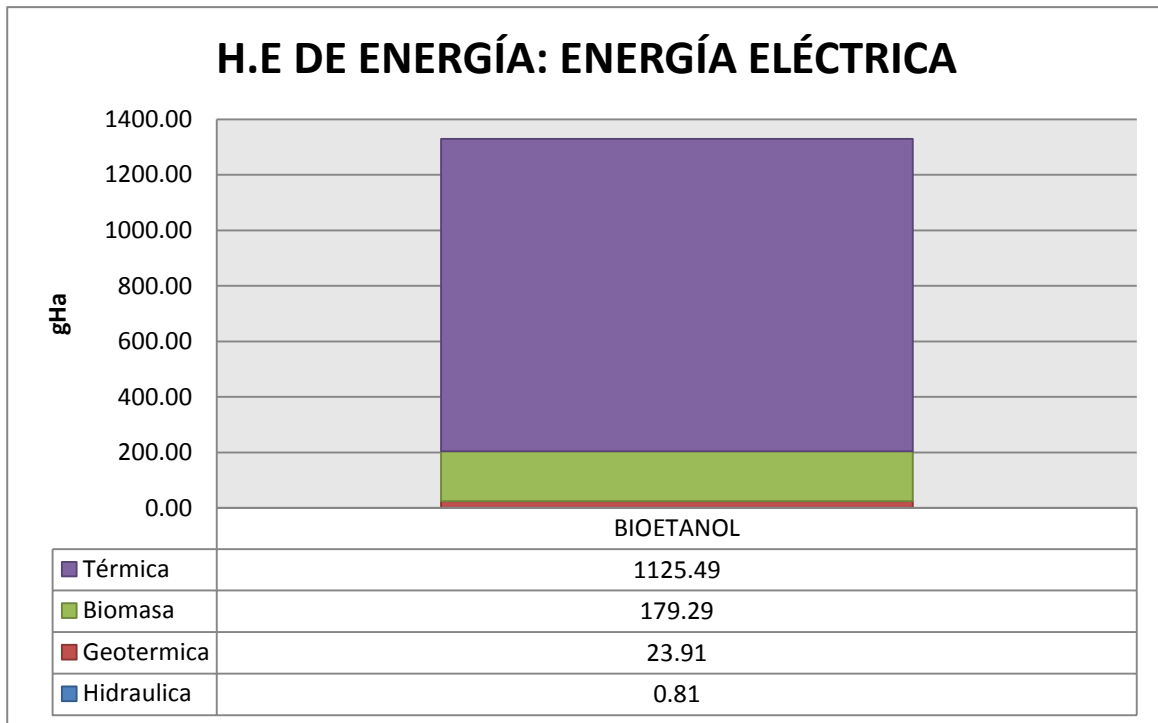


Figura 5-5 Huella ecológica de energía en la producción de BE.

Fuente: Elaboración propia

5.3.3 Huella ecológica de residuos

La HE de residuos está constituida por residuos generados por la materia prima, los vertidos generados en cada uno de los procesos en análisis y los residuos generados en el proceso por el consumo de materiales secundarios.

a) Biodiesel.

La HE de residuos en el proceso productivo de biodiesel, está constituido por el aporte de los residuos de materia prima, la cual corresponde a la cascarilla de higuerillo, maní y tempate, los vertidos que para el caso es el agua de proceso y el aporte por parte de los residuos de materia secundaria: gomas, fosfato trisódico, glicerina, hidróxido de sodio, silicato de magnesio, jabón y sulfato de sodio.

- **Biodiesel sin TEA.**

En la Tabla 5-5, se muestra la HE por los residuos generados en el proceso productivo de BD sin TEA, según el tipo de aceite proveniente de cada materia prima en estudios. Ver la Figura 5-6, en la cual se detalla la distribución de la HE de residuos según los diferentes grupos de los mismos, en la cual el eje secundario corresponde a la HE global por vertidos.

Tabla 5-5 Huella ecológica de residuos para BD sin TEA

Materia prima	H.E de Residuos (gHa)
Higuerillo	17.07
Maní	17.17
Tempate	16.16

Fuente: Elaboración propia

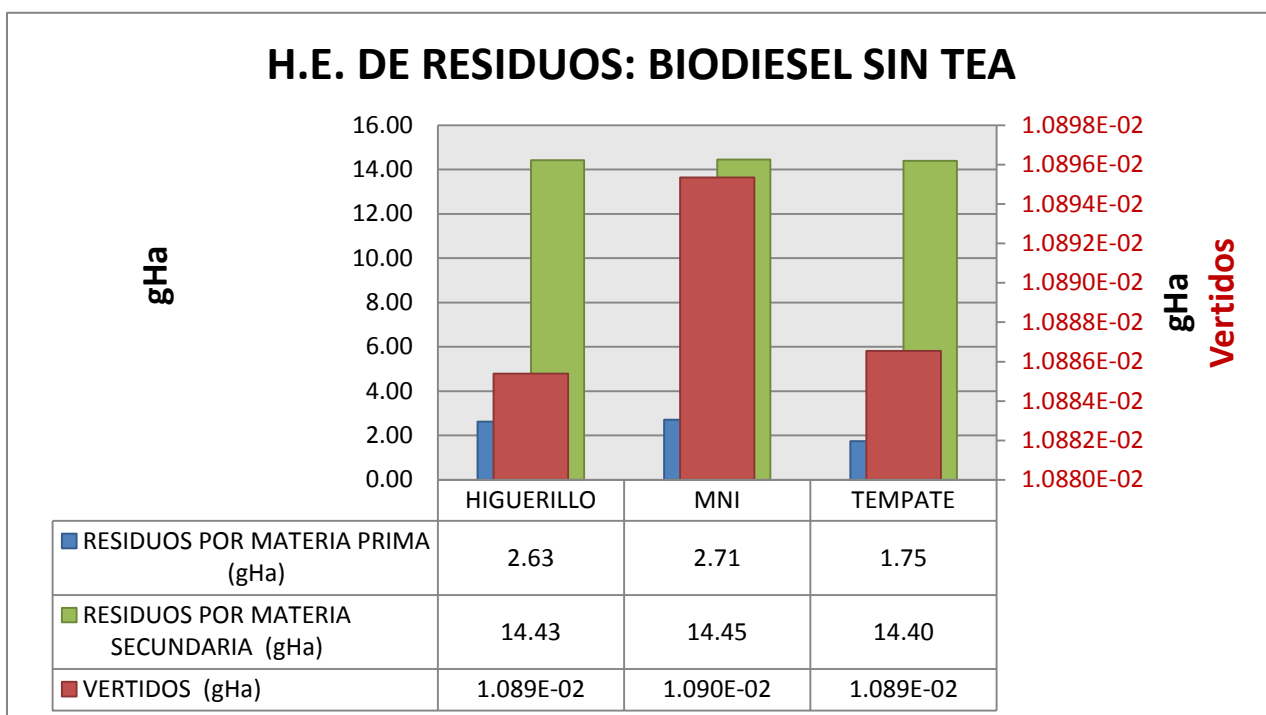


Figura 5-6 Huella ecológica de residuos en el proceso productivo de BD sin TEA.

Fuente: Elaboración propia

En la HE de residuos, los residuos generados por la materia secundaria tiene el mayor impacto, presentando el 84.5%, 84.2% y 89.1% para higuerrillo, maní y tempate respectivamente.

Los residuos generados por la materia prima son los siguientes componentes que contribuyen al aumento de la HE de residuos, representan un 15.4%, 15.8% y 10.8% para higuerrillo, maní y tempate respectivamente.

En el caso de los vertidos, dentro de la HE de residuos es prácticamente nula su participación en comparación de los residuos de materia prima y secundaria, para todos los casos representan el 0.1% de la HE de los residuos.

- **Biodiesel con TEA.**

En la Tabla 5-6, se muestra la HE por los residuos generados en el proceso productivo de BD con TEA, según el tipo de aceite proveniente de cada materia prima en estudio. Ver la Figura 5-7, en la cual se detalla la distribución de la HE de residuos según los diferentes grupos de los mismos, en el eje secundario se muestran la HE global por vertidos generados.

Tabla 5-6 Huella ecológica de residuos para BD con TEA

Materia prima	H.E de Residuos (gHa)
Higuerrillo	17.02
Maní	17.12
Tempate	16.12

Fuente: Elaboración propia

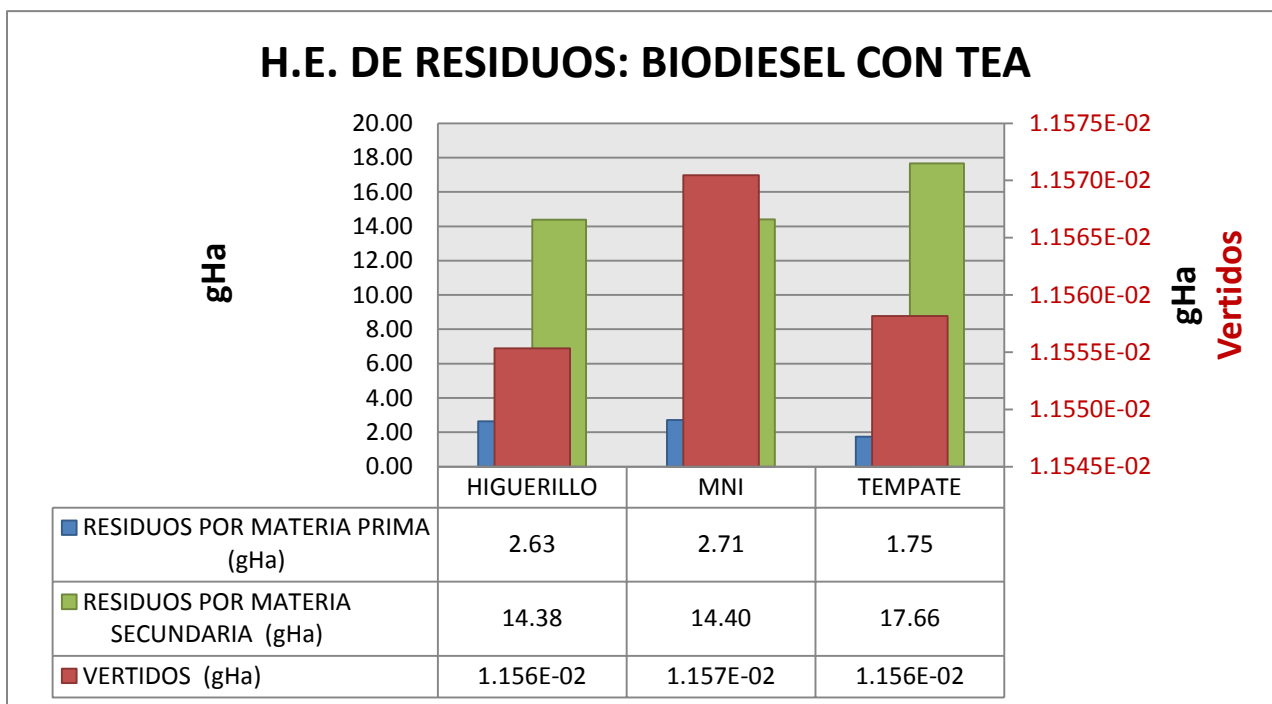


Figura 5-7 Huella ecológica de residuos en el proceso productivo de BD con TEA.

Fuente: Elaboración propia

En la HE de residuos, para el proceso productivo de BD con TEA, los residuos de materia prima presentan un 15.4%, 15.8% y 10.8%, los residuos secundarios un 84.3%, 83.9% y 88.8% para higuierillo, maní y tempate respectivamente.

El aporte de los vertidos en la HE de residuos para los tres casos es prácticamente nula, representa un 0.1% de la misma.

b) Bioetanol.

La HE de residuos para el proceso productivo de BE tiene un valor de 4,495.74 gHa, está constituida por residuos de materia prima, que para el caso es nula (0%); ya que el bagazo de la caña de azúcar es ocupado como biomasa para la generación de energía eléctrica, el impacto de los residuos de la materia secundaria es nula (0%), la de los vertidos de agua presenta un 3.4% de aportación dentro de la HE de residuos y las emisiones, que es Dióxido de Carbono, un 96.6%. Ver Figura 5-8.

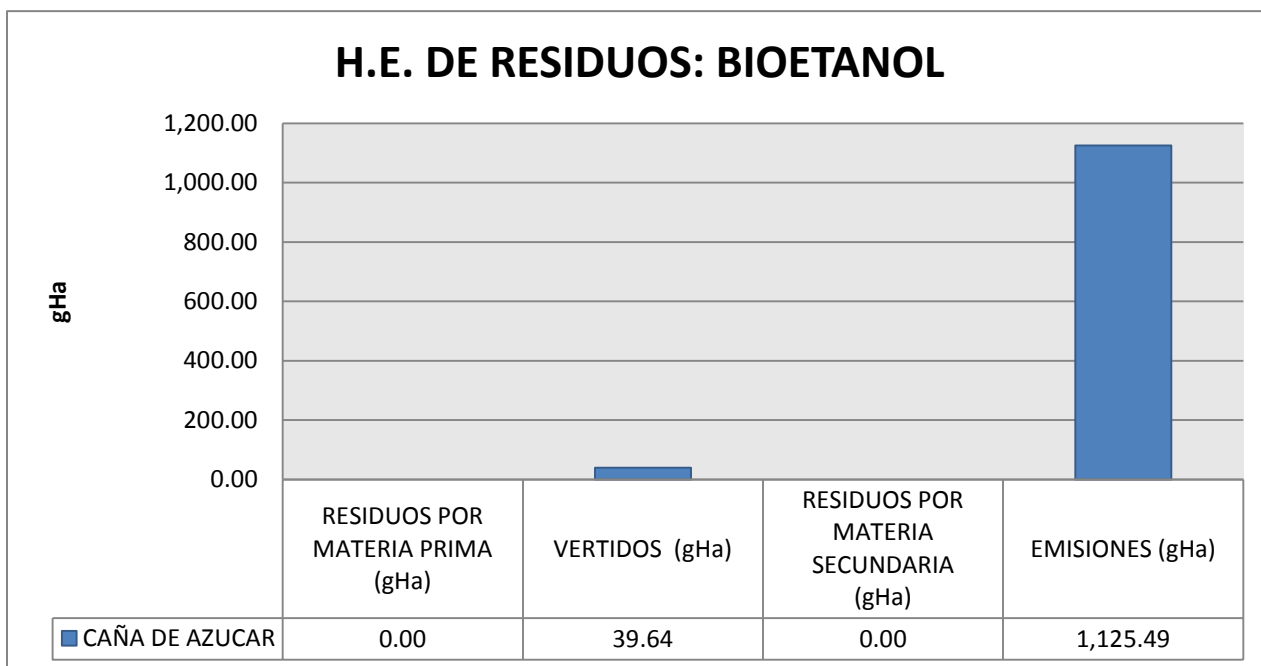


Figura 5-8 Huella ecológica de residuos en el proceso productivo de BE

Fuente: Elaboración propia

5.4 HUELLA ECOLÓGICA SEGÚN EL TIPO DE TERRENO

En el presente apartado, se da a conocer la HE de cada uno de los procesos productivos de biocombustibles líquidos, por cada tipo de terreno: tierras de cultivo, de pastoreo, bosques, agua marina y continental, superficie construida, tierra urbanizada y bosques para la captación de CO₂.

5.4.1 Biodiesel.

- **Biodiesel sin TEA**

Dentro de la HE total en el proceso productivo de BD sin TEA, la HE proveniente por el terreno de cultivo presenta mayor impacto ya que está presente con un porcentaje de 93.88%, 93.86% y 85.36%, seguida por los bosques para CO₂ con 6.06%, 6.04% y 14.52%, para higuierillo, maní y tempate respectivamente.

La superficie construida, tierras de pastoreo y bosques, presentan un porcentaje bajo en promedio rondan 0.03%, 0.02% y 0.02% respectivamente para los tres diferentes tipos de aceites.

La HE por terreno de agua marina y continental y tierra urbanizada son nulo dentro de la HE global para los tres casos. Ver Figura 5-9, dentro de la cual, en terrenos restantes se representan la superficie construida, tierras de pastoreo y bosques, cuya HE global se visualiza en el eje secundario de la misma.

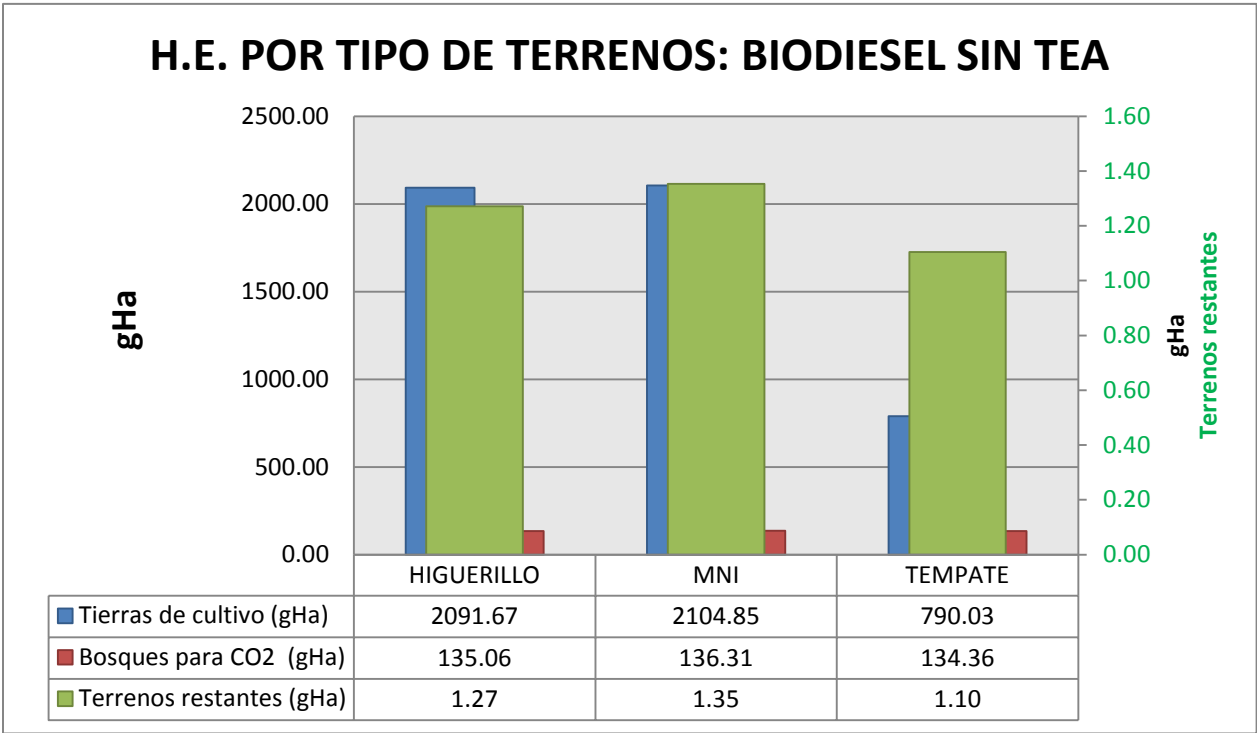


Figura 5-9 Huella ecológica según el tipo de terreno en el proceso productivo de BD sin TEA.

Fuente: Elaboración propia

- **Biodiesel con TEA.**

En el proceso productivo de BD con TEA, la HE global está constituida principalmente por el aporte de la huella por el terreno de cultivo, presenta un

porcentaje de 93.88%, 93.86% y 85.36%, seguida por la HE de bosques para CO₂ con 6.88%, 6.89% y 16.48% para higuerrillo, maní y tempate respectivamente.

La superficie construida, bosques y tierra de pastoreo presentan una participación mínima en la HE total, con un porcentaje de participación promedio de 0.03% para cada uno de los aceites, la HE aportada por agua marina y continental y tierra urbanizada es nula en los tres casos. Ver Figura 5-10, dentro de la cual, en terrenos restantes se representan la superficie construida, tierras de pastoreo y bosques, cuya HE global se visualiza en el eje secundario de la misma.

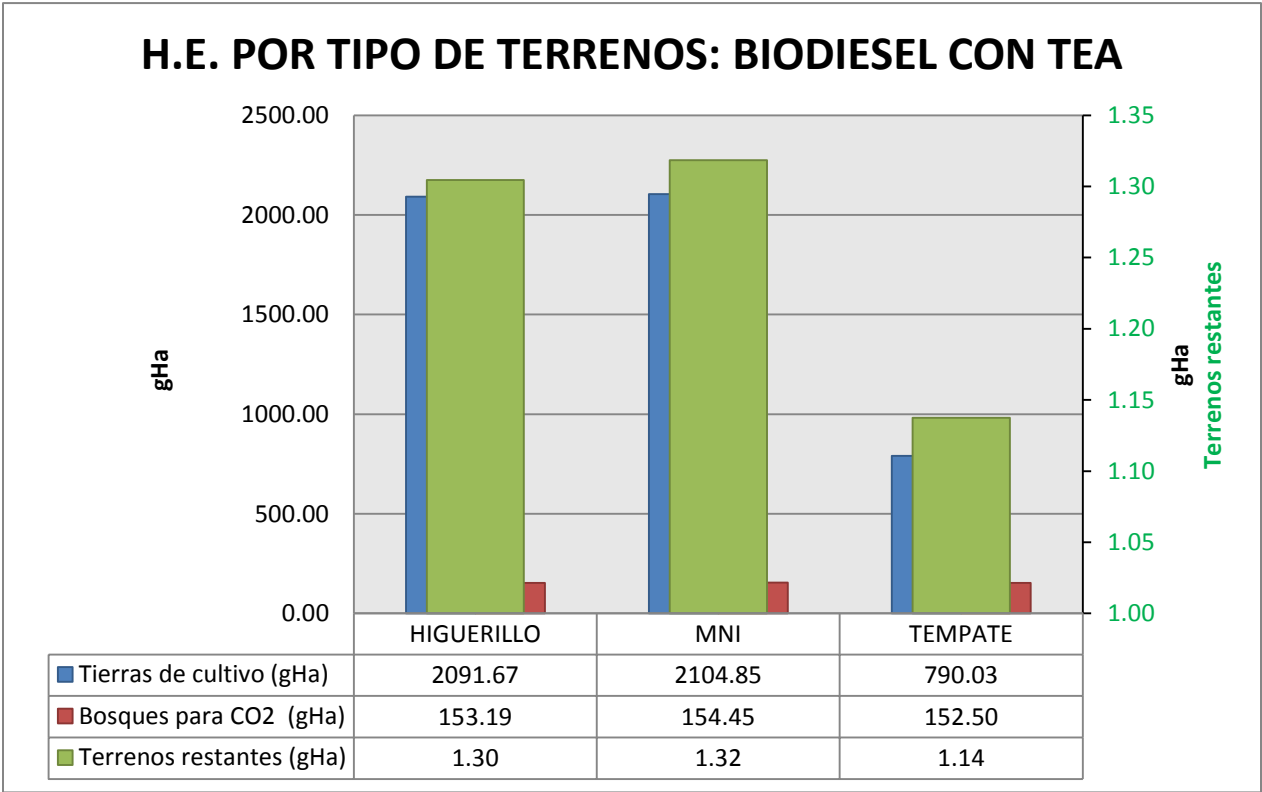


Figura 5-10 Huella ecológica según el tipo de terreno en el proceso productivo de BD con TEA.

Fuente: Elaboración propia

5.4.2 Bioetanol.

En la producción de BE, la HE global está constituida en un 74.64% de la HE asociada a bosques para CO₂, un 24.92% a tierras de cultivos, un 0.32% terreno de pastoreo, 0.11% a superficie construida, 0.1% a bosques y en cuanto al terreno de agua marina y continental y tierra urbanizada no presentan mayor significancia dentro de la HE total. Ver Figura 5-11, en la cual en la barra de tierras restantes está representada la HE del terreno de pastoreo, superficie construida y bosques.

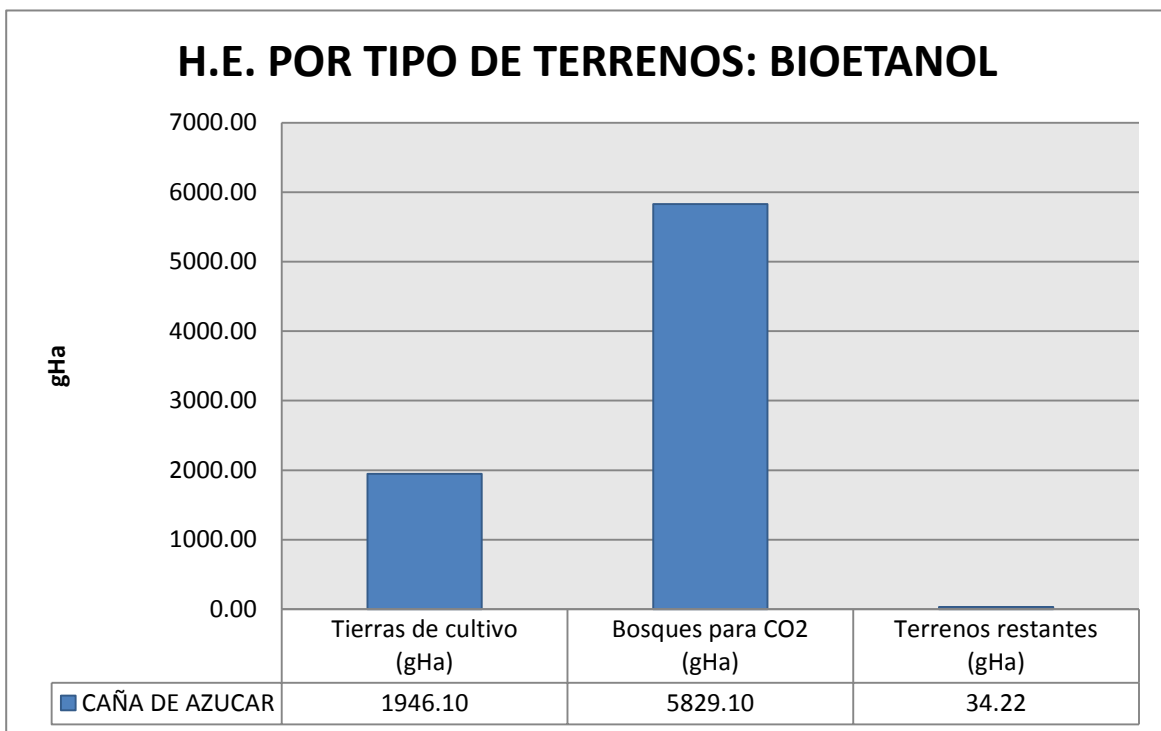


Figura 5-11 Huella ecológica según el tipo de terreno en el proceso productivo de BE.

Fuente: Elaboración propia

5.5 HUELLA ECOLÓGICA ESPECÍFICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS

En el presente apartado, se da a conocer la huella ecológica específica de los procesos productivos de cada uno de los biocombustibles líquidos en estudios, es

decir se presenta las hectáreas globales requeridas para producir ya sea una tonelada de BD o una tonelada de BE.

5.5.1 Biodiesel

La huella específica del proceso productivo de BD se aprecia en las Tablas 5-7 y 5-8, en la cual se verifica que la producción de BD empleando aceite de tempate presenta una menor HE específica, seguida del proceso empleando higuerrillo y por último el proceso productivo de BD empleando aceite de maní es el que presenta mayor HE específica, esta tendencia se cumple tanto en producción con TEA como la sin TEA.

Tabla 5-7 Huella ecológica específica de producción de BD sin TEA

Materia prima	BD producido (gal)	H.E Total (gHa)	H.E específica (gHa/ gal de biodiesel)
Higuerrillo	205,135.89	2,228.00	0.01086
Maní	212,953.31	2,242.45	0.01053
Tempate	215,180.26	925.50	0.00430

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-8 Huella ecológica específica de producción de BD con TEA

Materia prima	BD producido (gal)	H.E Total (gHa)	H.E específica (gHa/ gal de biodiesel)
Higuerrillo	209,701.99	2,246.16	0.01071
Maní	217,740.12	2,260.62	0.01038
Tempate	220,019.08	943.67	0.00429

Fuente: Elaboración propia

5.5.2 Bioetanol

La HE específica del proceso productivo de BE en El Salvador es de 0.00268 gHa/gal de BE producido. Ver Tabla 5-9.

Tabla 5-9 Huella ecológica específica de producción de BE

Materia prima	BD producido (Gal)	H.E Total (gHa)	H.E específica (gHa/ Gal de BE)
Caña de azúcar	2,910,488.63	7,809.42	0.00268

Fuente: Elaboración propia

5.6 COMPARACIÓN DE PROCESOS PRODUCTIVOS

A continuación, se presenta una comparación entre la productividad de BD por tipo de aceite y según su calidad, es decir, comparación entre la productividad aplicando TEA y sin aplicarlo, además de la comparación de la HE asociada a los mismos. De igual forma, se compara tanto la productividad como la HE entre la producción de BD y el BE en El Salvador.

5.6.1 Biodiesel

Se compara el proceso productivo de BD con y sin TEA, en promedio se produce 4,730.57 galones más de BD si se emplea TEA, ya que si bien los aceites son de menor calidad, el pretratamiento que se les aplica favorece a la mayor producción, sin embargo, este mismo lleva al mayor consumo de insumos, reactivos y energía, por lo cual la HE con TEA muestra un aumento de 18.17 gHa en promedio que si se trata de un proceso sin TEA. Ver Tabla 5-10.

Tabla 5-10 Comparación de producción de BD a partir de diferentes aceites

Puntos de comparación	Higuerillo	Maní	Tempate
Diferencia de producción de BD (Proceso con TEA-Proceso sin TEA)	4,566.10 galones de biodiesel	4,786.81 galones de biodiesel	4,838.81 galones de biodiesel
Diferencia de Huella ecológica (Proceso con TEA-Proceso sin TEA)	18.16 gHa	18.17 gHa	18.18 gHa

Fuente: Elaboración propia

5.6.2 Biodiesel-Bioetanol

Se compara el proceso productivo de BD (sin y con TEA) y el proceso productivo de BE, según la capacidad de producción de la única planta de producción de biodiesel, propiedad CENTA y considerando que ésta se emplea al 100% actualmente.

Actualmente, en El Salvador se produce más BE que biodiesel, comparando el proceso de producción sin TEA, produce 2, 699,398.81galones más de BE que de biodiesel, sin embargo por las implicaciones mismas del proceso productivo de BE, éste presenta una HE mayor, siendo 6,010.77gHa mayor que la del proceso de producción de BD sin TEA.

Comparando la producción de BD con TEA y la producción de BE, se producen 2, 694,668.24 galones de BE más que biodiesel, pero este último presenta una mayor HE, siendo 5,992.60gHa más en el proceso de producción de BE que el de biodiesel.

5.7 ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN ALTERNATIVOS

En el presente apartado se evalúa la HE de producción de biocombustibles líquidos asociada a diferentes escenarios que El Salvador podría optar ya sea para su implementación o como una opción viable para disminuir su impacto al ambiente.

La Tabla 5-11, muestra los escenarios a analizar en los siguientes apartados.

Tabla 5-11 Escenarios alternativos

Escenario 1	Utilización de la mezcla B10 y E10.
Escenario 2	Utilización de la mezcla B20 y E20.

Escenario 3	Producción de biodiesel combinando aceites empleados para mezcla B10.
Escenario 4	Producción de bioetanol a través de todos los ingenios azucareros.
Escenario 5	Producción de biocombustibles líquidos empleando toda el área de cultivo no cultivada en El Salvador.
Escenario 6	Producción de biodiesel con reutilización de cascarilla de maní.
Escenario 7	Valorización energética de cascarilla de higuerrillo y tempate.

Fuente: Elaboración propia

5.7.1 Escenario 1: Utilización de mezcla B10 Y E10

El presente escenario establece la HE de la producción requerida de BD y BE necesario para sustituir el 10% del consumo actual de diesel fósil y gasolinas.

a) Biodiesel.

El consumo nacional de BD para el año 2013 fue de 108, 244,607 galones (353,402 Ton⁹) (MINEC, 2011), según los impulsos por sustituir el 10% del consumo nacional de diesel fósil, se tiene que es necesario producir 10, 824,460.7galones de BD (35,340 Toneladas de biodiesel).

Para satisfacer la demanda de biodiesel, que permitirá cubrir el 10% del consumo de diesel se requiere las cantidades de aceite señaladas en la Tabla 5-12.

Tabla 5-12 Aceite requerido para producir el BD que cubra el 10% de diesel fósil consumido

Materia prima	Aceite requerido (L)	Aceite requerido (L) Con
	Sin TEA	TEA
Higuerrillo	134,620.15	131,689.42
Maní	135,406.59	132,429.64

⁹ Para convertir volumen a masa, se ha empleado la gravedad API del diesel de 32.4°API (Umaña, 2014).

Materia prima	Aceite requerido (L)	Aceite requerido (L) Con
	Sin TEA	TEA
Tempate	135,230.67	132,256.18

Fuente: Elaboración propia

La HE del presente escenario se detalla en la Tabla 5-13.

Tabla 5-13 Huella ecológica para producir el BD que cubra el 10% de diesel consumido

Materia prima	Huella Ecología Total (gHa)	Huella Ecología Total (gHa)
	Sin TEA	Con TEA
Higuerillo	97,221.21	97,784.63
Maní	100,496.51	98,972.66
Tempate	41,001.92	40,784.97

Fuente: Elaboración propia

b) Bioetanol.

El consumo nacional de gasolina regular fue de 84,194,109 galones y de gasolina súper fue de 53,180,695 galones, haciendo un total de 137,374,809 galones de gasolina (389001.46 Ton¹⁰) para el año 2013 (MINEC, 2011), para sustituir el 10% del consumo nacional de la gasolina total, se tiene que es necesario producir 8,419,410.9 galones de BE (38900 Ton). La HE de dicha producción es de 27,525.12 gHa.

¹⁰ Para convertir volumen a masa, se ha empleado la gravedad API de la gasolina regular y de la gasolina súper (56.00 y 59.85°API respectivamente) (Umaña, 2014).

5.7.2 Escenario 2: Utilización de mezcla B20 Y E20

a) Biodiesel.

Para este escenario, se necesita producir 21, 648,921.4 galones de biodiesel, para ello se requiere las cantidades de aceites mostradas en la Tabla 5-14, según la materia prima de origen.

Tabla 5-14 Aceite requerido para producir el BD que cubra el 20% de diesel consumido

Materia prima	Aceite requerido (L)	
	Sin TEA	Con TEA
Higuerillo	269240.31	263378.85
Maní	270813.18	264859.28
Tempate	270461.34	264512.36

Fuente: Elaboración propia

La huella ecológica para este escenario se da a conocer en la Tabla 5-15.

Tabla 5-15 Huella ecológica para producir el BD que cubra el 20% de diesel consumido

Materia prima	Huella Ecológica Total (gHa)	
	Sin TEA	Con TEA
Higuerillo	194426.15	195550.29
Maní	200976.76	197926.34
Tempate	81987.58	81550.98

Fuente: Elaboración propia

b) Bioetanol.

El proceso productivo de BE requerido para cubrir la demanda del 20% de las gasolinas en el mercado salvadoreño, muestra que es necesario producir 27, 474,961.8 galones de BE, lo cual genera una huella ecológica de 537,20.73 gHa.

5.7.3 Escenario 3: Producción de biodiesel combinando aceites para mezcla B10

Para cubrir el 10% del consumo de diesel fósil (10824460.70 galones), se plantea producir BD empleando diferentes proporciones de aceites de tempate con el resto de aceite de maní o de higuerrillo empleados, requiriendo en cada uno de ellos la implementación del aceite de tempate por el hecho de presentar una menor HE; los requerimientos de cada tipo de aceite y su correspondiente HE se muestran en las Tablas 5-16 y 5-17

Tabla 5-16 Producción y huella ecológica de combinación de aceite de Tempate-Maní

TEMPATE – MANÍ					
% Aceite de tempate	Aceite Tempate	Aceite Maní	Huella Tempate	Huella Maní	H.E TOTAL
10%	13374.34	120526.30	4105.20	89762.89	93868.08
20%	26748.68	107134.49	8192.78	79791.19	87983.97
30%	40123.03	93742.68	12280.36	69819.49	82099.86
40%	53497.37	80350.87	16367.95	59847.80	76215.74
50%	66871.71	66959.06	20455.53	49876.10	70331.63
60%	80246.05	53567.25	24543.11	39904.40	64447.52
70%	93620.40	40175.43	28630.70	29932.71	58563.40
80%	106994.74	26783.62	32718.28	19961.01	52679.29
90%	120369.08	13391.81	36805.86	9989.31	46795.18
100%	133743.42	0.00	40893.45	0.00	40893.45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-17 Producción y huella ecológica de combinación de aceite de Tempate-Higuerrillo

TEMPATE – HIGUERILLO					
% Aceite de tempate	Aceite Tempate	Aceite Higuerrillo	Huella Tempate	Huella Higuerrillo	H.E TOTAL
10%	13374.34	119839.31	4105.20	60209.35	64314.55

TEMPATE – HIGUERILLO					
% Aceite de tempate	Aceite Tempate	Aceite Higuerrillo	Huella Tempate	Huella Higuerrillo	H.E TOTAL
20%	26748.68	106523.83	8192.78	55051.66	63244.44
30%	40123.03	93208.35	12280.36	49893.97	62174.33
40%	53497.37	79892.87	16367.95	44736.28	61104.22
50%	66871.71	66577.39	20455.53	39578.59	60034.12
60%	80246.05	53261.92	24543.11	34420.90	58964.01
70%	93620.40	39946.44	28630.70	29263.21	57893.90
80%	106994.74	26630.96	32718.28	24105.51	56823.80
90%	120369.08	13315.48	36805.86	18947.82	55753.69
100%	133743.42	0.00	40893.45	0.00	40893.45

Fuente: Elaboración propia

Para las mezclas con una participación entre 10% y 70% de aceite de tempate la HE de la producción de BD es menor si se emplea aceite de higuerrillo; si las mezclas son del 70% al 100% de aceite de tempate la HE es menor si se acompaña con aceite de maní. (Figura 5-12)

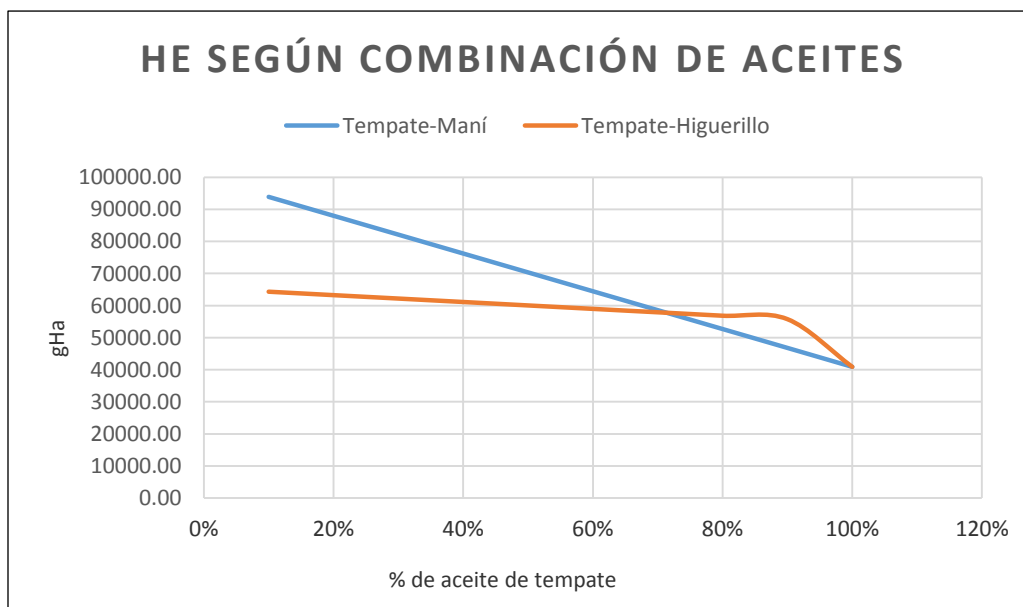


Figura 5-12 Comparación de Huella Ecológica según mezclas de aceites

Fuente: Elaboración propia

5.7.4 Escenario 4: Producción de bioetanol a través de todos los ingenios azucareros

El presente escenario plantea la posibilidad de producir BE, teniendo en cuenta la producción de melaza a través de los 6 ingenios azucareros y no sólo la del Ingenio La Cabaña como hasta hoy en día.

Con lo cual se produciría 1, 677,645.40 toneladas de azúcar (Romero, 2013) y 503,293.6203 toneladas de melaza requiriendo de 6962060.65 toneladas de caña de azúcar, lo cual generaría 19, 710,043.21 galones de BE, cubriendo de esta manera el 14% del consumo actual de gasolina en El Salvador.

Desarrollando el presente escenario, la HE del proceso productivo es de 45,211.97 gHa.

5.7.5 Escenario 5: Producción de biocombustibles líquidos empleando toda el área de cultivo no cultivada en El Salvador

El Salvador cuenta con 20720 km² de área de tierra, sin incluir la superficie cubierta por masas de agua interiores y exteriores. (Banco Mundial, 2014).

Se dispone en El Salvador de 412,462 manzanas (288,233.40 Ha) de tierra ociosa (MAG, 2014), apta para siembra de materia prima para la producción de BD o BE.

En la Tabla 5-18 se da a conocer la cantidad de BD y BE que se puede llegar a producir si se siembra toda el área de cultivo disponible en El Salvador, así como también la HE correspondiente a dicha producción.

Tabla 5-18 Huella ecológica para la producción biocombustibles líquidos en el terreno de cultivo no cultivable

	Materia Prima	Área productiva (Ha)	BD producido (gal/año)	Huella ecológica (gHa)
SIN	Higuerillo	287942.93	70891242.07	764246.60
TEA	Maní	287986.05	73131722.16	764527.91
	Tempate	287574.14	196597678.12	830737.46
CON	Higuerillo	287943.05	72458612.04	769580.30
	Maní	287944.87	74764821.63	769729.96
	Tempate	287464.56	221440844.93	844548.81
	Materia Prima	Área productiva (Ha)	BE producido (gal/año)	Huella ecológica (gHa)
	Caña de azúcar	269600.30	1011756590	2253905.52

Fuente: Elaboración propia

5.7.6 Escenario 6: Producción de biodiesel con reutilización de cascarilla de maní

Debido a que la cascarilla de maní puede llegar a ser utilizada como alimento para ganado, se plantea el presente escenario, en el cual toda la cascarilla de maní es utilizada para tales fines, por ello se descuenta la huella ecológica de residuos generada por dicha cascarilla.

Por lo anterior, teniendo en cuenta la capacidad total de la actual planta de biodiesel, propiedad del CENTA, se tiene los resultados mostrados en la Tabla 5-19.

Tabla 5-12 Productividad y H.E de la producción de BD a través de aceite de Maní con reutilización de cascarilla

Producción de Biodiesel	Volumen producido (gal)	Huella ecológica total (gHa)	Huella ecológica por residuos (gHa)
SIN TEA	212953.31	2239.74	14.46
CON TEA	217740.12	2257.91	14.41

Fuente: Elaboración propia

5.7.7 Escenario 7: Valorización energética de cascarilla de higuerrillo y tempate

La cascarilla de higuerrillo y de tempate puede ser implementada como combustible de alimentación a la caldera, durante el proceso de extracción del aceite de cada una de las semillas, es decir que la cascarilla deja de ser considerada como residuos, por lo cual su aportación en la HE de residuos es cero, y su aporte energético es descontado de la energía térmica consumida durante el proceso.

Considerando como base la producción de la planta del CENTA al 100% de su capacidad y empleando el 100% de la cascarilla de cada semilla como combustible, se tienen los resultados mostrados en la Tabla 5-20 y 5-21.

Tabla 5-20 Producción de BD a través de Higuerrillo con valorización energética de cascarilla

Producción de BD a partir de higuerrillo	Volumen producido (gal)	HE consumo de materiales (gHa)	HE por residuos (gHa)	HE de energía (gHa)	HE total (gHa)
SIN TEA	205,135.89	2,194.68	14.44	1.14	2,210.25
CON TEA	209,701.99	2,210.17	14.39	3.44	2,225.88

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-13 Producción de BD a través de Tempate con valorización energética de cascarilla

Producción de BD a partir de tempate	Volumen producido (gal)	HE consumo de materiales (gHa)	HE por residuos (gHa)	HE de energía (gHa)	HE total (gHa)
SIN TEA	215,180.26	893.08	14.41	1.14	908.62
CON TEA	220,019.08	908.59	14.36	3.44	924.28

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El siguiente apartado es de suma importancia ya que se expone cuál de los procesos productivos de biocombustibles líquidos es más conveniente desde el punto de vista ambiental para El Salvador, así como también si dicho país cuenta con la superficie necesaria para producir los recursos que permitan desarrollar una industria ambientalmente sostenible. Para la elección de la materia prima óptima para la producción de BD se hace una comparación entre cada uno de ellos recomendando aquel que sea más viable de emplear. Por último, se hace una comparativa entre varios escenarios futuros que El Salvador podría optar para emplear estos biocombustibles líquidos, también alternativas para reducir la huella ecológica de éstos. Uno de los aspectos importantes a discutir es si la implementación de estos biocombustibles líquidos en términos económicos es viable para el país.

6.1 ESCENARIO BASE DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL Y BIOETANOL EN EL SALVADOR

Los resultados mostrados en el capítulo 5, demuestran que actualmente es mayor la producción de BE respecto a la de BD en aproximadamente 14 veces en términos de volumen. Este resultado es atribuido a que la producción de BE es en base a melaza un subproducto de la fabricación de azúcar por lo cual siempre en periodo de zafra se cuenta con la materia prima requerida para su producción, en

cambio el BD es en base a semillas oleaginosas a pesar que El Salvador cuenta con terrenos destinados a su cultivo no están siendo potenciados actualmente lo cual incurre en una producción parcial.

Al analizar y comparar la HE de la producción de los biocombustibles líquidos, se aprecia que independientemente de la calidad del aceite base para la producción de biodiesel, se requiere en promedio 1807.73 gHa, y para la de BE 7809.42 gHa, es decir, que la HE de BD representa aproximadamente el 23.15% de la HE de la producción de BE, y que la HE de la producción de BE (7809.42 gHa) es 432% mayor que la de biodiesel. La HE específica del BE (0.0027gHa/gal) es aproximadamente 3 veces menor que la de BD (0.0085 gHa/gal).

Por ello, para producir la misma cantidad de ambos biocombustibles líquidos se recomienda producir BE, ya que la producción de BD demanda 3 veces más el terreno requerido para la producción de BE. Ver Tabla 6-1 en la cual se hace una comparación en términos de requerimientos de superficie para ambos procesos productivos de biocombustibles líquidos en relación al área superficial de El Salvador, así como el área de cultivo ociosa de dicho país.

Tabla 6-1 Comparación de procesos productivos de biocombustibles líquidos en términos de requerimiento en relación con el área superficial y el terreno ocioso de El Salvador

Biocombustible líquido	Requerimiento (Ha)	% Área superficial de El Salvador¹¹	% Área de cultivo ociosa de El Salvador¹²
Biodiesel	663.01	0.032	0.23
Bioetanol	829.16	0.040	0.29

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la producción de BD, según los resultados obtenidos y presentados en el capítulo anterior, se evidencia que aunque los aceites usados como materia

¹¹ Área superficial de El Salvador de 2072000 Ha (Banco Mundial, 2014)

¹² Área de cultivo ociosa de El Salvador 288233.40Ha (MAG, 2014)

prima sean de menor calidad, la obtención de BD es relativamente mayor que con aceites de alta calidad (aproximadamente 2% más de producción), esto debido a que el pretratamiento que se aplica favorece la productividad del biodiesel, pero esto conlleva a mayor consumo de insumos, reactivos y energía, lo cual se traduce en una mayor necesidad de área productiva necesaria, se requiere el 0.02% más de tierra productiva para el proceso con TEA que el proceso sin TEA.

Además, dentro de los aceites analizados y empleados en la producción de biodiesel en El Salvador, los resultados arrojan que su producción, utilizando aceite de tempate, requiere una menor área de terreno productivo (315.54 Ha). Esto conlleva a que su huella ecológica sea la menor de todos los escenarios tanto si el aceite es de baja o alta calidad, es decir que para producir BD a través de aceite de tempate se requiere únicamente el 38% de toda el área requerida si su producción fuera a partir de aceite de maní o de higuerrillo, es decir que requiere 2.64 más de área para producir BD a partir de maní o higuerrillo que con tempate.

Aunque la producción de BD en toneladas se ve favorecida con el uso de aceite de higuerrillo, la producción en galones es menor, ya que su densidad es grande respecto a la del BD proveniente de maní o de tempate, se produce 3.7% menos volumen de BD con aceite de higuerrillo que con aceite de maní y 4.7% menos que con aceite de tempate.

Entre el BD proveniente de maní o tempate, se produce el 1.0% más de galones de BD a través de tempate que a través de maní.

Por su parte, el Ministerio de Agricultura de El Salvador ha identificado el área de terreno en El Salvador con potencial para cultivo de tempate e higuerrillo (323829Ha), en base a esta disponibilidad de superficie productiva, la producción de BD a través de cualquiera de estos dos aceites utilizaría en promedio $0.205\% \pm 0.007\%$ de dicha superficie; sin embargo, para el año 2008 se destinaron 245 Ha

para la siembra de tempate y 387 Ha para siembra de higuerrillo (MARN, 2011), es decir para la producción de BD el área que está siendo cultivada de cada una de las semillas oleaginosas no satisface la demanda, ya que para la producción de BD a partir de tempate se requiere de 315.54 Ha en cambio a través de higuerrillo se requiere de 834.12Ha.

Comparando ambas alternativas se recomienda la producción de biodiesel de aceite de tempate ya que para el mismo volumen de producción su área productiva requerida es menor y su productividad mayor, ver Tabla 6-2.

Tabla 6-2 Producción y área productiva requerida para BD según materia prima

Proceso Aceite	Sin TEA		Con TEA	
	Área productiva (Ha)	Producción de BD (GAL)	Área productiva (Ha)	Producción de BD (GAL)
Higuerrillo	834.06	205,135.89	834.18	209,701.99
Maní	839.31	212,953.31	839.43	217,740.12
Tempate	315.48	215,180.26	315.60	220,019.08

Fuente: Elaboración propia

El área para cultivo de caña de azúcar en El Salvador es de 322,956 Ha (MARN, 2011), por lo tanto el terreno que estaría asociado a la siembra de este cultivo para la producción de BE corresponde 829.15 Ha, que en relación con la disponibilidad total representa un 0.26%, con la disponibilidad de las tierras ociosas se requiere el 0.29%, con estos porcentajes de área requerida se logra satisfacer la producción de BE sin poner en riesgo la seguridad alimentaria, lo que es conveniente ya que el cultivo de caña de azúcar es aprovechado todo desde su jugo hasta su bagazo, además que el BE actualmente es producido a partir de un residuo de la fabricación de azúcar, por lo cual el fin principal que es obtener azúcar siempre se estaría llevando a cabo. Además se debe de considerar varios aspectos como el ambiental, económico y social y evaluar cuál de los usos de la melaza es el más adecuado para El Salvador.

Por su parte el ingenio La Cabaña, único productor de BE en El Salvador, cuenta con 15000 Ha destinadas al cultivo de caña de azúcar (La Cabaña, 2011), de la cual sólo el 5.5% se utilizaría para suplir la demanda de BE. En general, se requiere mayor área productiva destinada para BE sin embargo la producción en volumen es mayor en comparación con la de BD, por ello se recomienda, en términos de áreas y producción implementar la utilización de BE.

6.1.1 Huella ecológica según el tipo de flujo: materiales, energía y residuos

Los resultados de los componentes de la HE respecto al proceso productivo de cada uno de los biocombustibles líquidos en El Salvador, muestran que para el caso de BD, el aporte por el consumo de materiales es el mayor y prácticamente es toda la composición de la HE, aproximadamente es el 98%, de éste el consumo de semilla oleaginosas representa el 92.54% y el 7.46% por consumo de insumos y reactivos, por lo cual para la producción de semillas oleaginosas se recomienda investigar y emplear métodos de cultivo que optimicen las áreas de producción natural, en cuanto al aporte por el consumo de energía y generación de residuos en la HE, es poco significativo ya que representan cada uno el 1% de la HE total.

Respecto a la producción de BE en El Salvador, el componente que mayor contribución tiene en la HE es la asociada a los residuos con un porcentaje del 58%, específicamente éste se relaciona con la emisión de CO₂ biogénico, el consumo de materiales representa el 25% y por último el consumo de energía el 17%.

En la Tabla 6-3 se presentan los porcentajes de cada uno de los componentes que participan en la HE asociada a los procesos de producción de los biocombustibles líquidos para El Salvador.

Tabla 6-3 Porcentajes de los componentes de la huella ecológica para los procesos productivos de los biocombustibles líquidos

COMPONENTES DE LA HUELLA ECOLOGICA			
Flujo	Materiales	Energía	Residuos
Proceso productivo			
Biodiesel	98%	1%	1%
Bioetanol	25%	17%	58%

Fuente: Elaboración propia

Al relacionar los datos mostrados en la Tabla 6-3 se puede notar que la mayor demanda para la producción de BD está asociada al consumo de materiales por lo cual se requiere una mayor superficie para la producción de los mismos, en cambio la producción de BE necesita un mayor área para poder asimilar las emisiones generadas en su proceso.

6.1.2 Huella ecológica según tipo de terreno

En la HE de producción de BD el requerimiento de terreno de cultivo representa el 91% de la misma, debido a que su mayor demanda es de materia prima, es decir de las semillas oleaginosas. El terreno de bosques para absorción de CO₂ debido a la generación de residuos generados en el proceso representa el 9%, y las tierras asociadas a pastoreo, bosques y superficies construidas presentan un aporte nulo a la HE de producción de BD. Ver Tabla 6-4.

En cuanto a la producción de BE, el terreno que presenta la mayor significancia son los bosques para la absorción de las emisiones de CO₂, éstos representan dentro de la HE total el 74.6%, las tierras de cultivo representan el 24.9%, debido al consumo de caña de azúcar para la producción de azúcar de la cual se extrae la melaza, subproducto requerido para la producción de BE, las tierras asociadas a pastoreos, bosques y superficies construidas en conjunto tienen un aporte del 0.4%. Ver Tabla 6-4.

Tabla 6-4 Porcentajes de los terrenos asociados a la huella ecológica para los procesos productivos de los biocombustibles líquidos

COMPONENTES DE LA HUELLA ECOLOGICA			
Flujo Proceso productivo	Tierras de cultivos	Tierras de bosques para absorción de CO2	Tierras de pastoreo, bosques, superficie marina costera y superficie construida
Biodiesel	91%	9%	0%
Bioetanol	24.9%	74.6%	0.4%

Fuente: Elaboración propia

Según el aporte de cada uno de los terrenos a la HE total de ambos procesos productivos se hace notorio que el BD demanda mayor productividad natural para la obtención de las materias primas, mientras que BE requiere mayor terreno para asimilar las emisiones. Y en base a los datos proporcionados por el MARN y el Banco Mundial (2014) El Salvador dispone de área apta para cultivos y no para asimilar las emisiones de CO₂ por ende, mientras las emisiones de CO₂ sean liberadas a la atmosfera se recomienda la producción de BD; sin embargo, si se logran emplear mecanismos para poder captar dichas emisiones y darles otro uso sería más favorable la producción de BE ya que el proceso demandaría menor superficie productiva.

6.2 ANÁLISIS DE ESCENARIOS ALTERNATIVOS

6.2.1 Escenario 1: Utilización de mezcla B10 Y E10

Para poder sustituir el consumo del 10% de diesel fósil por BD, se requiere disponer de 29,349.56 Ha en promedio, el área de cultivo disponible es de 288,233.40 Ha (MAG, 2014) del cual se requeriría el 10.18% en promedio para realizar una mezcla B10 (12.5% si se emplea higuierillo, 13.0% maní y el 4.9% para tempate), el terreno identificado como apto para la siembra de higuierillo y tempate es de 323,829Ha (MARN, 2011) del cual se ocuparía el 9.1%.

Si se considera el terreno registrado por el Ministerio de Agricultura de 323,829 Ha (MARN, 2011), apto para siembra de tempate o de higuerrillo, y relacionándolo con la demanda requerida de terreno (36581.12 Ha para higuerrillo y 14032.82 Ha para tempate) para un B10 se tendría que disponer de un 11.30% de ese terreno destinado para la siembra de semillas oleaginosas de higuerrillo y un 4.33% para tempate únicamente, en promedio para los tres tipos de aceites se emplearía un 9.1% de la tierra disponible para la siembra de semilla oleaginosa.

De acuerdo a los porcentajes presentados se verifica que la disponibilidad de terreno es suficiente para producir el 10% del diesel fósil consumido en la actualidad, es decir que el proceso desde el punto de vista ambiental y evaluado a través del indicador de HE es sostenible ambientalmente.

La utilización de la mezcla E10 requeriría 3188.36 Ha, lo cual indica que de todo el terreno salvadoreño se destinaría el 0.154% para la producción de BE, si se implementara el terreno ocioso del país para la producción de BE se requeriría el 1.1%, en cuanto al área productiva que posee el ingenio La Cabaña, es necesario el 21.3% para cultivar la caña de azúcar para producir el azúcar del cual se obtiene la melaza necesaria para la producción del BE, si se considera el área potencial para siembra de caña de azúcar se estaría utilizando sólo el 0.987% de esta área.

Ambientalmente, la producción de E10 en El Salvador, es sostenible ya que se dispone del área suficiente para poder sembrar la caña de azúcar y ser procesada a azúcar, que de dicho proceso se obtendrá la melaza necesaria para la producir la mezcla, esto se logra sin poner en riesgo la seguridad alimentaria del país.

- **Huella ecológica en relación al tipo de flujo: materiales, energía y residuos.**

En la Tabla 6-5 se presentan los resultados para los tipos de flujos que componen la HE de los procesos productivos de B10 Y E10.

Tabla 6-5 Porcentajes de los componentes de la huella ecológica para los procesos productivos de los biocombustibles líquidos

COMPONENTES DE LA HUELLA ECOLOGICA			
Flujo	Materiales	Energía	Residuos
Proceso productivo			
Biodiesel	98.87%	0.03%	1.10%
Bioetanol	29.1%	4.8%	66%

Fuente: Elaboración propia

En base a los datos anteriores se puede notar que en cuanto a la producción de B10 el mayor aporte estará representado por materiales (98.87%), seguido de residuo (1.10%), y por último con un 0.03% de energía. En la mezcla E10 el mayor aporte estará representado por residuo (66%), seguido de materiales (29.1%), y por último con un 4.8% de energía.

Comparando ambas alternativas de sustitución en términos de materiales será más apropiada E10, en cuanto al flujo de energía B10 y la generación de residuos es B10.

- **Aproximación económica.**

En promedio el precio de la gasolina es de \$2.91/gal (Index Mundi 3, 2014), es decir que por la producción del 10% de BE para sustituir la gasolina consumida el país se podría ahorrar aproximadamente \$39, 907,382.01/ anuales en factura de gasolinas y \$25281430/anuales por consumo de diesel.

En general, comparando la producción de mezcla B10 con una E10 se recomienda optimizar una mezcla E10, ya que se requiere el 89% menos de área productiva que si se produce B10, además se produce aproximadamente 12 veces más volumen de BE que de BD, económicamente la producción de una mezcla de BE es más conveniente, ya que el sustituir el 10% del consumo de gasolinas se ahorró el 37% más que sustituir el 10% del consumo de diesel.

6.2.2 Escenario 2: Utilización de mezcla B20 Y E20

La sustitución del 20% del consumo de diesel fósil por BD, requiere disponer de 58,275.23 Ha en promedio, en cuanto a la disponibilidad actual de terreno apto para cultivo es de 288,233.40 Ha (MAG, 2014) se requiere destinar en promedio un 20.22% del mismo (25.4% para higuerrillo, 25.5% maní y el 9.7% para tempate).

Del terreno disponible únicamente para la siembra de higuerrillo o tempate se requiere un 18.0% del mismo para producir una mezcla B20, en cuanto a la superficie total de El Salvador se emplearía un 2.8% para producir la mezcla B20.

La utilización de la mezcla E20 requeriría 6,322.97 Ha de terreno productivo, el cual al relacionarlo con el terreno de El Salvador se implementaría un 0.31% del mismo, y el 2.2% de las 288,233.40 Ha de terreno ocioso del país (MAG, 2014).

Teniendo en cuenta el área productiva que posee el ingenio La Cabaña sería necesario disponer del 42.2% para poder producir un E20, recordando que esta producción no implica dejar de producir azúcar.

Sin embargo, El Salvador cuenta con 322956 Ha (MARN, 2011) disponibles para la siembra de caña de azúcar de la cual sólo el 1.96% sería necesario para suplir la demanda de una mezcla E20.

- **Huella ecológica en relación al tipo de flujo: materiales, energía y residuos.**

En la Tabla 6-6 se presentan los resultados para los tipos de flujos que componen la HE de los procesos productivos de BD y BE.

Tabla 6-6 Porcentajes de los componentes de la huella ecológica para los procesos

COMPONENTES DE LA HUELLA ECOLOGICA			
Flujo	Materiales	Energía	Residuos
Proceso productivo			
Biodiesel	98.89%	0.01%	1.10%
Bioetanol	30.0%	2.0%	68.0%

Fuente: Elaboración propia

En base a los datos anteriores se puede notar que en cuanto a la producción de B20 el mayor aporte en la HE es debido al consumo de materiales (98.89%), seguido de la generación residuo (1.10%), y por último por el consumo de energía (0.01%). En la mezcla E20 la generación de residuos representa el mayor porcentaje de la HE (68.0%), seguido del consumo de materiales (30%), y por último, por el consumo de energía con un 2.0%.

Comparando ambas alternativas de sustitución en términos de materiales será más apropiada E20, en cuanto al flujo de energía B20 y la generación de residuos es B20.

Por lo tanto, comparando la utilización de una mezcla B20 con una E20 en cuanto a disponibilidad de terreno apto para cultivo, será mejor opción la E20 ya que se requiere aproximadamente 89% menos que si se produjera B20.

- **Aproximación económica.**

Si se sustituye el 20% del consumo de diesel fósil por BD, el país se ahorraría aproximadamente \$50, 562, 860.01/anuales y \$79, 814, 764.03/anuales si se sustituye el 20% del consumo de gasolinas por BE, por lo cual, económicamente se recomienda también optimizar la sustitución del 20% del consumo de gasolinas ya que se ahorra el 37% más que si se produce BD.

Para realizar el cambio en el motor para E20 sólo es necesario el comprar un kit de conversión de combustible que ronda entre los 40 y los 200 dólares dependiendo del tipo de vehículo, más los gastos de instalación del mismo. Los kits de conversión de gasolina permiten funcionar con combustibles alternativos. Se suministran en modelos 4, 6 y 8 cilindros, con conversor de un tamaño de 21x31 cms y un peso de 1 kg. (ACC, 2014)

6.2.3 Escenario 3: Producción de biodiesel combinando aceites para mezcla B10

Para poder realizar una mezcla B10 utilizando como materia prima una combinación de aceites (higuerillo, tempate y maní), se debe de utilizar aceite de tempate ya sea con aceite de maní o de higuerillo, por ser el proceso de producción que presentara una menor HE en todos los casos y la mayor producción de BD, por tal razón como se presentó en el capítulo 4, se realizó una combinación de aceites desde un 10% hasta un 100% (tempate) obteniendo para ello un punto óptimo que es aproximadamente un 70%. Se lograría producir 10,824,460.7 galones de BD, para lo cual es necesario disponer para una mezcla de tempate-maní (TM) 21,054.24 Ha que representaría un 7.31% de la tierra ociosa de El Salvador y el 6.50% de la tierra identificada para siembra de semilla oleaginosa (MARN, 2011); para una mezcla tempate-higuerillo (TH) es necesario disponer 20,798.15 Ha que representaría un 7.21% de la tierra ociosa de El Salvador y el 6.42% de la tierra identificada para siembra de semilla oleaginosa (MARN, 2011) en comparación con el escenario 1, el cual requeriría el 10.183%

de las tierras ociosas y el 9.06% de la tierra destinada para semilla oleaginosa, ambas alternativas para elaborar un B10 en términos generales es más apropiada la mezcla TH ya que demanda una menor área productiva, hasta una mezcla 70%-30%, de ahí en adelante es recomendable una mezcla TM.

La combinación maní-higuerillo no se consideró como un escenario alternativo de producción de BD, ya que dicha producción a través de estas materias primas fueron las que presentaron la mayor HE, debido a la baja productividad natural de cada una de las semillas; sin embargo, considerando que el maní empleado para la producción de BD es tercera calidad, se puede optimizar la producción de BD a través de la mezcla de aceite de tempate y maní, no así la de higuerillo-maní por ser ambos los de menor rendimiento de producción.

- **Huella ecológica en relación al tipo de flujo: materiales, energía y residuos.**

En la Tabla 6-7 se presentan los resultados para los tipos de flujos que componen la HE del proceso productivo de biodiesel.

Tabla 6-7 Porcentajes de los componentes de la huella ecológica para el proceso productivo de B10

COMPONENTES DE LA HUELLA ECOLÓGICA			
Flujo	Materiales	Energía	Residuos
Mezcla			
Tempate-higuerillo	98.7%	0.1%	1.3%
Tempate-maní	98.8%	0.1%	1.2%

Fuente: Elaboración propia

Comparando ambas alternativas para elaborar un B10 en términos de materiales será más apropiada la mezcla TH. En cuanto al flujo de energía se pueden usar ambos de igual forma y la generación de residuos es TM.

6.2.4 Escenario 4: Producción de bioetanol a través de todos los ingenios azucareros

Al aplicar para fines energéticos toda la melaza producida en los 6 ingenios que operan en El Salvador, se lograría producir 19,710,043.21 galones de BE al año, cubriendo de esta manera el 14% del consumo actual de gasolina en El Salvador, a la vez se producirían 1,677,645.401 Ton de azúcar al año, para llevar a cabo este escenario se debe disponer de 5304.80 Ha que en relación con el área de cultivo de caña de azúcar (MARN, 2011) disponible para El Salvador sólo el 1.64% de ésta se utilizaría, en cambio en lo que respecta a los terrenos ociosos del país el 1.84% sería necesario disponer del mismo. En relación al terreno disponible de El Salvador sólo será necesario el 0.256% y el 35.4% de la capacidad instalada del Ingenio La Cabaña.

La elaboración de BE a partir de toda la melaza generada en zafra es buena opción para suplir una demanda de E10 o E20, debido a que la disponibilidad actual de terreno para siembra de caña de azúcar sufre las necesidades de materia prima sin poner en riesgo el fin principal de este cultivo que es la fabricación de azúcar.

6.2.5 Escenario 5: Producción de biocombustibles líquidos empleando toda el área de cultivo no cultivada en El Salvador

Al emplear todo el terreno no cultivable disponible, se llegaría a producir 118, 214, 153.49 galones al año de BD o 1, 011, 756, 590 galones al año de BE.

Relacionando ambas producciones que se pueden dar utilizando el terreno ocioso con el que se cuenta se lograría cubrir el 100% del consumo actual de diesel fósil y además un 10% extra, y con la producción de BE se lograría producir 7.4 veces el consumo actual de gasolina. Este escenario considera utilizar estas superficies para fines energéticos con lo cual se entraría a la controversia de la seguridad alimentaria si se dispusiera incrementar el cultivo de algún grano básico, de o

existir el requerimiento extra de tierras de cultivo para incrementar la siembra de productos de canasta básica, se recomienda emplear el terreno para producir semilla oleaginosa en lugar que el terreno continúe ocioso.

Económicamente, si se emplea todo el terreno ocioso para la producción de BD, El Salvador podría ahorrarse \$276.10 millones anuales de la factura petrolera y \$2,939.15 millones anuales por la producción de BE empleando todo el terreno ocioso, lo cual nos indica que tanto por la producción como por el ahorro económico es más conveniente y prioritario la producción de BE que la de BD.

Además, trabajar la tierra ociosa de El Salvador contribuiría grandemente en el aspecto social ya que la siembra de caña de azúcar, o en su efecto de semillas oleaginosas demanda mano de obra, lo que se traduce en empleos directos.

6.2.6 Escenario 6: Producción de BD con reutilización de cascarilla de maní

La cascarilla de maní se ha considerado en los anteriores escenarios como un residuo; sin embargo, ésta puede llegar a ser utilizada como alimento para ganado, por tal razón la HE total de BD a partir de esta materia prima disminuiría, ya que en condiciones normales el 16% de la huella de residuos corresponde a la participación de la cascarilla de la semilla de maní.

En promedio la HE resultante sería 2248.83 gHa y comparada con el resultado del apartado 6.1 (2251.54 gHa) representaría una disminución de 2.71 gHa, este resultado es importante ya que nos indica que el medio ambiente requiere menos superficie para asimilar los residuos generados.

6.2.6 Escenario 7: Valorización energética de cascarilla de higuierillo y tempate

La valorización energética de la cascarilla de higuierillo y de tempate dentro de la HE tiene un impacto muy significativo, y mucho más dentro de la HE de energía,

ya que al descontar del consumo de energía eléctrica por recurso térmico éste se vuelve en valores negativos, lo que nos da un indicio que valorizando la cascarilla se aporta mucha más energía térmica de la requerida en el proceso.

En promedio la HE de energía es de 2.28 gHa, sin valorización energética de las cascarillas, en promedio es de 17.61 gHa, es decir que la HE por consumo de energía disminuye 8 veces si se valoriza la cascarilla energéticamente a que si no se valoriza.

La HE total, en promedio, con valorización energética es de 1,567.26 gHa, sin valorización es de 1,585.83 gHa, es decir que disminuye un 1.2%, además la HE de residuos pasa disminuir un 15%.

Por lo anterior se recomienda que se valore totalmente la cascarilla de higuierillo y de tempate para la producción de BD y se implemente como combustible para la caldera, ya que de esta forma se reduce el área requerida del medio ambiente para asimilar los residuos de la cascarilla y se reduce el consumo de energía térmica, dando como resultado una disminución total en la HE de cada proceso productivo.

CONCLUSIONES

El estudio de campo realizado con la finalidad de conocer la huella ecológica de los biocombustibles líquidos en El Salvador, indica que es uno de los primeros acercamientos en este tipo de estudio en nuestro país, a pesar de ser uno de los indicadores ambientales más modernos con el que actualmente se están realizando estudios en otros países, razón que hace importante el aporte de esta investigación para ser pioneros en el análisis de los procesos por medio de esta herramienta ambiental.

La producción de biocombustibles líquidos en El Salvador, es un tema del quehacer nacional que en la actualidad requiere de mayor impulso que ampare tanto su producción como su implementación. La producción de biodiesel para el año 2008 estaba siendo realizada por 8 empresas nacionales; sin embargo, actualmente sólo el CENTA produce a nivel experimental y con fines de investigación. A pesar que a principios de año se estaba produciendo para utilizar una mezcla B10 en la flota de vehículos para el SITRAMS, a la fecha esta producción se encuentra en paro. El bioetanol en la actualidad es producido únicamente por el Ingenio La Cabaña con el único fin de su venta a empresas que no pertenecen al sector transporte, ya sea como alcohol hidratado, alcohol deshidratado o alcohol neutro (potable). Aun no es inyectado en la flota de vehículos en ninguna de su mezcla con gasolina (E10, E20, etc.) a pesar que el país ya cuenta con la tecnología para su procesamiento.

La comparación del resultado de la huella ecológica de los procesos de producción de los biocombustibles líquidos en El Salvador demuestran que tanto el BD como el BE, son sostenibles ambientalmente, basados en que el área demandada por cada uno de los procesos se encuentra disponible a nivel macro (área total de El Salvador) como a nivel micro (tierra de cultivos y área propia destinada para la siembra de caña de azúcar y semillas oleaginosas).

Desde el punto de vista ambiental la producción de BE es más sostenible que la de BD, ya que para una misma disponibilidad de área productiva el proceso presenta una mayor huella ecológica (9 veces), por lo cual si se deseara producir la misma cantidad de cada uno de los biocombustibles líquidos, obtener BE requerirá menor área productiva que el BD. Además el BE se genera a partir de un subproducto de la fábrica de azúcar, por ello no se compromete la seguridad alimentaria ya que siempre estará orientada la caña de azúcar a la producción de azúcar, lo cual lleva a tener mayores argumentos que el proceso productivo de BE es más sostenible ambientalmente que el BD.

La producción de bioetanol para El Salvador es más sostenible ambientalmente que la del biodiesel ya que si se requiere producir la misma cantidad de ambos combustibles líquidos, se tendría que disponer exactamente 2.81 veces más terreno para producir biodiesel que bioetanol.

Al establecer una comparativa en cuanto al resultado de la huella ecológica para bioetanol a nivel nacional en relación con otros estudios de la misma índole, se evidencia una gran diferencia en términos de hectáreas globales atribuida primeramente a las materias primas, al tipo de tecnología empleada y tiempos de producción.

En lo que respecta a BD la materia prima más adecuada para la producción en El Salvador es el aceite de tempate, ya que además de presentar una huella ecológica menor en comparación con el resto de aceites estudiados, es el que mejores rendimientos de transformación a BD presenta.

Respecto al aceite de higuerrillo y el aceite de maní, la mayor productividad es para el aceite de maní además de ser el que mayor huella ecológica presenta; sin embargo, entre ambos es más conveniente producir BD a través de aceite de maní, ya que la significancia de requerimiento de área productiva es mínima en comparación con los mayores niveles de producción que se obtienen en su

implementación respecto al aceite de higuerrillo. También es importante enfatizar que se prefiere aceite de maní, ya que la utilización de esta materia prima no entra en disputa con la seguridad alimentaria debido a que se emplean semillas de tercera clase, lo que hace que su implementación sea respaldada.

El proceso productivo de BD es preferible llevarse a cabo utilizando aceites de alta calidad, es decir de bajo porcentaje de AGL, ya que si se utilizara aceites de baja calidad éstos requieren de un pretratamiento (TEA) el cual incide en un aumento de consumo de materiales y energía a pesar que a partir de ellos se logra obtener un poco más de BD respecto a los de alta calidad, además de requerir mayor área para asimilar el proceso lo que hace sean menos sostenible ambientalmente.

En la producción de BD a partir de mezclas de aceites para lograr una sustitución del 10% de diesel fósil se recomienda emplear aceite de tempate (70%) ya sea con aceite de higuerrillo o maní (30%), debido a que esta mezcla es la que presentó menor huella ecológica; por lo tanto, todos los requerimientos necesarios para su producción son los menores comparados con las demás mezclas de aceites. Si se diera a partir de aceite de maní se hace indispensable la valoración de las cascarillas ya que se logra reducir la huella ecológica de manera significativa. Por lo cual, se hace indispensable revalorar los residuos de cascarilla para la producción de BD a partir de cualquier semilla oleaginosa ya que esto contribuirá a ser más sostenible la producción de éste desde el punto de vista ambiental.

La valorización energética de la cascarilla de tempate e higuerrillo es de suma importancia y se concluye que es la mejor opción de BD, ya que se requiere menos área para producir la energía eléctrica que demandan los procesos y menor área para asimilar los residuos del mismo.

La utilización de una mezcla B10 o E10 para El Salvador tiene su amparo en la Política Energética de dicho país a pesar que ésta no ha sido aprobada y

actualmente se encuentra en estudio; sin embargo, este escenario de sustitución es sostenible desde el punto de vista ambiental ya que se dispone del área necesaria para suplir las necesidades que los procesos productivos demandan, pero es importante analizar más el compromiso de tierras que se pueden destinar a mejorar la seguridad alimentaria del país. Por lo tanto; se recomienda utilizar E10 debido a que ya se dispone de la tecnología de producción y actualmente la capacidad instalada del Ingenio La Cabaña basta para suplir esta demanda nacional.

El uso de una mezcla B20 o E20 para El Salvador sería una opción luego de la utilización de B10 o E10, la cual requerirá una mayor sustitución de diesel fósil o gasolina que se verá reflejado en una mayor demanda de superficie para satisfacer los requerimientos de los procesos productivos. Por lo tanto, se recomienda utilizar E20 dado que además que se dispone de la tecnología de producción se cuenta con una capacidad suficiente para suplir esta demanda por parte de la planta productora, así como también la materia prima necesaria para llevarse a cabo es baja respecto a B20; sin embargo, es necesario establecer un método de captura de las emisiones en la etapa de fermentación para así contribuir al medio ambiente y disminuir su incidencia en la huella ecológica.

El Salvador es un importador de recursos fósiles lo que conlleva a gastar enormes cantidades de dinero en su adquisición, por tal razón es necesario recurrir a la utilización de combustibles alternativos. El consumo de gasolina en la actualidad responde a millones de galones; sin embargo, esta demanda puede ser cubierta en un 14% si se dispusiera producir bioetanol empleando toda la melaza generada en los 6 ingenios azucareros del país. Una de las mayores controversias de este escenario es que la melaza también es utilizada para otros fines no sólo energéticos sino como alimento para ganado, jaleas, panadería, etc., tal razón hace la reflexión que este escenario no será posible de emplear ya que es necesario seguir empleando cierto porcentaje de melaza en los demás usos.

RECOMENDACIONES

Realizar campañas a nivel nacional con el tema de huella ecológica de los combustibles alternativos ya que en la actualidad temas de esta índole son de suma importancia y la mayoría de las veces desconocidos por las personas, además que El Salvador es un país que depende de los recursos fósiles para realizar diversas labores diarias; por lo tanto, se hace necesario realizar o aplicar algún cambio a esa dependencia ya que éstos cada día su costo de adquisición se vuelve cada vez más elevado.

Para trabajos futuros es necesario realizar investigación sobre metodología de cálculo de la huella ecológica de la energía proveniente de la geotermia ya que en la actualidad son escasos los estudios relacionados con este tema y El Salvador es uno de los países que cuenta con este tipo de recursos geotérmico para la generación de electricidad. También ejecutar investigaciones donde se recopile los datos de interés para poder llevar a cabo el balance de materia y energía de los procesos productivos de BD y BE actualizados para El Salvador ya que en esta investigación se han utilizados datos antiguos y de otros países debido a la falta de información.

Para posteriores investigaciones es necesario cuantificar la HE de la producción de BE a partir de otras alternativas, como ejemplo el jugo de caña ya que El Salvador dispone de una superficie considerable para la siembra de este cultivo, considerando el hecho que si se mantiene la producción actual de azúcar queda aún espacio suficiente para destinar caña de azúcar a fines energéticos y establecer una comparativa entre el proceso de bioetanol a partir de melaza respecto al de utilizar directamente el jugo de caña y así poder establecer que proceso conviene aplicar en El Salvador. Además esta opción respalda el escenario 5 dado que se utilizaría el jugo de caña directamente para la producción de BE y no se entraría en disputa por la cantidad de azúcar producida si se realizara con melaza.

Es necesario que las empresas implementen dentro de sus operaciones los diversos usos que se le puede dar a las cascarillas de las semillas oleaginosas utilizadas en la producción de BD, con lo cual se estaría disminuyendo la HE de dicho proceso y aprovechando al máximo lo que actualmente se considera un residuo para algunas semillas.

Uno de los aportes importantes de esta investigación es que se hace necesario aplicar métodos de capturas para las emisiones de CO₂ de la etapa fermentativa para producir BE y a la vez darles un posterior uso (hielo seco, incorporación a otros procesos, etc.), con lo cual se estaría disminuyendo su HE y haciendo que el proceso sea más sostenible ambientalmente.

El porcentaje de energía relacionado con la HE de los procesos productivos de BE y BD puede verse disminuido si las empresas productoras utilizaran alguna fuente de energía alternativa con la finalidad de ahorrar consumo de energía eléctrica que es distribuidas por diversas empresas en El Salvador. La opción de aplicación de estas fuentes alternativas implica una alta inversión económica y a la vez una disminución en la factura eléctrica que favorece la economía de la empresa.

Deben de realizarse más investigaciones en el área de biocombustibles que no fueron cubiertos por este estudio (utilización de otras materias primas, tecnologías, etc.), así como el cálculo de la huella ecológica a partir de otros límites de sistema (desde la siembra de la materias primas, los subprocesos necesarios para producir biocombustibles, cálculos con capacidad máxima de la planta de bioetanol, etc.) con la finalidad de construir una panorámica más grande del impacto al medio ambiente.

Por último, se deben de desarrollar otras investigaciones de la producción de biocombustibles líquidos en El Salvador que incluyan tanto la sostenibilidad ambiental como económica y social para brindar un panorama más completo de

dichos procesos y decidir cuál conviene desde el punto de vista de los tres aspectos.

REFERENCIAS

ACC. (2014). *Kit de conversion de etanol*. Recuperado de Kit de conversion de etanol: <http://www.ecofuelbox.com/en/3-Cylinders-Ethanol-e85-Kit.html>

Ahmad, M., Rashid, S., Ajad, M., Zafar, M., Sultana, S., y Gulzar, S. (2008). *Optimization of base catalyzed transesterification of peanut oil biodiesel*. Laboratorio de Biodiversidad y Biocombustibles; Departamento de Ciencias Vegetales; Universidad de Quaid-i-Azam; Islamabad, Pakistan.

Alternative Energy. (2014). *Energía de la biomasa*. Recuperado de Energía de la biomasa: <http://www.altenergy.org/>

Alvarez Maciel, C. (2009). *Biocombustibles: Desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional*. Recuperado de: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IQ_biocombustibles_4a_generacion_25608.pdf

Anderson, B., Batchelor, A., Blakewell, D., et al. (2006). *The Future of Geothermal Energy. Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*. Instituto de Tecnología de Massachusetts; Departamento de Energía de Estados Unidos, Subsecretaría de Eficiencia Energética y Energía Renovable. Massachusetts, Estados Unidos.

Anderson, R. (2010). *The Fischer-Tropsch Synthesis*. Orlando: Academic press.

Arias, C. (2014). *Informe Biotecnología II*. Recuperado de: <http://www.scribd.com/doc/185410998/Informe-Biotecnologia-II-Semestre-2013>

- ASC. (2012). *Manual de indicadores*. Recuperado: http://cucutanortedesantander.gov.co/apcafiles/32363133353336366335333464633762/manual_indicadores_alcaldia_cucuta.pdf
- ATPP. (2008). *Densidad y peso específico*. Aplicaciones Técnicas Procesos Productivos Recuperado de <http://www.atpplleal.com>
- AYD. (2011). *Cuatro generaciones de biocombustibles en búsqueda de la sustentabilidad*. Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, L.P.D. Monterrey N.L., Mexico. Recuperado de: https://www.google.com/sv/search?q=Biomasa&oq=Biomasa&aqs=chrome..69i57j0l5.8903j0j4&sourceid=chrome&espv=210&es_sm=93&ie=UTF-8#q=biocombustibles+de+primera+segunda+y+tercera+generacion
- Babcok, R.E. (2006). *Biodiesel, propiedades*. Recuperado de: www.soliclima.com
- Balat, M. (2010). *Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – A review of current work*. Sila Science & Energy Company, University Mah, Trabzon, Turkey
- Banco Mundial. (2014). Área de tierra (Kilómetros cuadrados). Recuperado de: <http://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.TOTL.K2/countries?display=default>
- Bateo, P. (2014). *Desarrollo sustentable*. Recuperado de: <http://es.scribd.com/doc/213870526/DESARROLLO-SUSTENTABLE>
- Bayle, A. (1984). *Aceites y grasas industriales*, segunda edición. España. Recuperado de: <http://books.google.com/sv/booksid=xFjGDCmLuKQC&pg=PA125&lpg=PA125&dq=composicion+del+aceite+de+mani+segun+los+acidos+grasos&source>

[=bl&ots=HyEEmM6YN1&sig=HO_mYS4sfMd23_WGw14um9ymE9M&hl=es&sa=X&ei=qpKYU4WBHzisATHt4KYCQ&ved=0CCYQ6AEwAg#v=onepage&q&f=true](#)

Benavides, A., Benjumea, P. y Pashova, V. (2007). *El biodiesel de aceite de higuera como combustible alternativo para motores diesel*. Grupo combustibles alternativos, Universidad Nacional de Colombia; Medellín, Colombia.

Berrios, G.G. y Castro M.R. (1998). *Potencial Energético de Residuos Agrícolas en El Salvador. Parte: Maíz (Zea mays) y Caña de Azúcar (Saccharum officinarum)*. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador.

BID-CEL. (2007). *Diagnóstico de la producción de etanol por medio de la caña de azúcar. Informe Preliminar Final - diagnóstico de los aspectos agrícolas para la producción de etanol a partir de caña de azúcar*. San Salvador: Gerencia de Inversiones y Energías Renovables, CEL.

Biocombustibles avanzados USA. (2011). *Generaciones 1, 2, 3 y 4 de biocombustibles*. Recuperado de <http://advancedbiofuelsusa.info/biofuels-basics/biofuels-basics>

Bioetanol. (2008). *Producción de bioetanol*. Recuperado de: <http://www.bioetanoldecana.org/es/download/cap3.pdf>

Biomass energy center. (2011). *Que es biomasa*. Recuperado de: http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page_pageid=76,15049&dad=portal

BRC. (2008). *Manual de operaciones para las plantas de biodiesel de Centroamérica*. Biosgeos Research Corporation. Medellín, Colombia.

Caballero, M., & Zelada, M. (2004). *Propuesta de un diseño de sistema de medición y control de los cambios cualitativos y cuantitativos en los activos biológicos para mejorar la información contable-financiera, para la toma de decisiones de las empresas dedicadas a la actividad agrícola*. Universidad Francisco Gavidia. San Salvador, El Salvador.

Carranza, M. (2014). *Introducción al proceso de fabricación de etanol*. Visita técnica a Ingenio La Cabaña. El Salvador.

Castro, R. (2008). *Plan de acción para el desarrollo de la estrategia de Biocombustibles. Cooperación técnica no reembolsable N°ATN/OC-1089-ES*. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal, El Salvador.

CEPAL. (2003). *Sostenibilidad y desarrollo sostenible: un enfoque sistémico*. Recuperado de:
<http://www.cepal.org/publicaciones/xml/6/14256/lcl1864p.pdf>

CEPAL. (2011). *Estudio regional sobre economía de los biocombustibles 2010*. Recuperado de:
<http://www.cepal.org/ddpe/agenda/2/42932/esteconomiabiocombustiblesdialpol.pdf>

Chicas, F. (2009). *Etanol*. Recuperado de:
<http://www.miportal.edu.sv/Sitios/operacionred2008/OR08051141/Etanol.html>

Clarimón, L., Fernández, C., y Sánchez, B. (2005). *Informe sobre el empleo de combustibles renovables: biodiesel*. Departamento de Medio Ambiente C.C.O.O Aragón, Zaragoza.

CNE (2014). *Informe anual 2013 del mercado eléctrico de El Salvador*. Consejo Nacional de Energía; Dirección de Mercado Eléctrico. San Salvador, El Salvador.

CNE. (2011). *Biocombustibles*. Recuperado de: http://www.cne.gob.sv/index.php?option=com_content&view=article&id=121&Itemid=14

Comisión Económica Para América Latina y El Caribe (CEPAL). (2007). *Diagnóstico preliminar de los aspectos agrícolas para producción local de etanol, a base de caña de azúcar en américa central*. Organización de las Naciones Unidas. Recuperado de: <http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/9/28019/L767.pdf>

CONAE. (2008). Ficha técnica: vehículos con etanol. Recuperado de: <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/466/1/images/vehiculoetanol.pdf>

Consejo Argentino para la Información y Desarrollo de la Biotecnología. (2007). www.argenbio.org. Recuperado de: <http://www.argenbio.org/index.php?action=novedades¬e=181>

Cordero Pinchansky, S. (2011). *Evaluación ambiental estratégica de la política energética de el salvador*. Recuperado de: <http://www.marn.sv/component/phocadownload/category/31-evaluacion-ambiental-estrategica.html?download=201:eae-politica-energetica-de-el-salvador-pen>

Cordero, S. (2011). *Evaluación Ambiental Estratégica de la Política Energética de El Salvador*. Informe Final, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, San Salvador.

De Blas, C.; Mateos, G.G. y Rebollar, P.G^a. (eds.). (2003). *Tablas FEDNA de composición y valor nutritivo de alimentos para la formulación de piensos compuestos (2ª ed.)* Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. Madrid, España. 423 pp.

Delgado, V. y Cabral, I. (2010). *Guía técnica de rubros agropecuarios, Campaña Agrícola 2010-2011*. Ministerio de Agricultura y Ganadería; Viceministerio de Agricultura; Dirección de Extensión Agraria. San Lorenzo, Paraguay.

Doménech Quesada J. L. (2006). *Guía metodológica para el cálculo de la huella ecológica corporativa. Terceros Encuentros Internacionales sobre “Desarrollo sostenible y población”*. eumed.net. Universidad de Málaga.

Doménech Quesada J. L. (2008). *Huella Ecológica Corporativa: Empresa Ejemplo*.

Duffey, A. (2011). *Estudio regional sobre economía de los biocombustibles 2010: temas clave para los países de América Latina y el Caribe*. Diálogo de Políticas sobre desarrollo institucional e innovación en biocombustibles en América Latina y el Caribe. Santiago de Chile: CEPAL, GTZ.

Duran, G. (2013). *Medir la sostenibilidad*. Recuperado de: <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/ec/jec7/pdf/com1-6.pdf>

EE. (2009). *Centrales de biomasa*. Recuperado de: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educarecursosinteractivos/produccion-de-electricidad/xiv.-las-centrales-de-biomas

EFA. (2010). *ECOLOGICAL FOOTPRINT ATLAS*. Recuperado de: http://www.footprintnetwork.org/images/uploads/Ecological_Footprint_Atlas_2010

Erazo Cornejo, J.A.; Cuéllar Lemus, S.M. y Vaquerano Castro X.M. (1994). *Optimización de la velocidad de agitación y concentración de levadura en la ruptura de la pared celular de la levadura Saccharomyces uvarum residual de la elaboración de cerveza*. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador.

- Escardino, A. (2013). *Bioetanol: qué es y cómo se obtiene*. Recuperado de Bioetanol:<http://www.cultivarsalud.com/general/sostenibilidad/bioetanol-que-es-y-como-se-obtiene/>
- Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística. (1997). Sitio Web de Universidad del Valle. Recuperado de: http://www.oei.es/salactsi/uvalle/gde_tema5.htm
- FAO. (2013). *La alimentación y la agricultura en cifras*. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. Recuperado de: <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/203563/>
- Fernandez, D., Serqueira, D., Portela, F., Assunção, R., Muñoz, R. y Terronez, M. (2012). *Preparation and characterization of methyl and ethyl biodiesel from cottonseed oil and effect of tert-butylhydroquinone on its oxidative stability*. Instituto de Química de la Universidad Federal de Uberlandia; Brasil.
- Fernandez, J. (2006). *Energía de la biomasa: tipos de biomasa y su aprovechamiento energético*. Recuperado de: <http://www.scribd.com/doc/245561382/biomasa-eficiencia-energetica>
- Fuentes, A. E., & Paredes Acevedo, E. M. (2011). *Diseño y construcción de una máquina despulpadora de tempate para la generación de biodiesel*. Trabajo de graduación, Universidad de El Salvador, San Salvador.
- FUNDE. (2010). *Primera aproximación a las oportunidades y amenazas de los biocombustibles en Centroamérica*. San Salvador: Offsset Ricaldone.
- GAIA. (2008). *BioEtanol. Grupo de Aviación, Ingeniería y Arquitectura*. Recuperado de: http://www.grupogaia.com/Dossier_BIOetanol_ESP.pdf
- Ganduglia, F. (2009). *Manual de Biocombustible*. Asociación Regional de empresas de petróleo y gas natural en Latinoamérica y El Caribe, Lima.

Garzon Castaño, S. C., Hernandez Londoño, C. (2009). *Estudio comparativo para la producción de etanol entre Saccharomyces cerevisiae silvestre, Saccharomyces cerevisiae ATCC 9763 Y Candida utilis ATCC 9950*. Universidad Tecnológica de Pereira; Colombia.

GFN. (2009). *Global Footprint network*. Recuperado de: http://www.footprintnetwork.org/es/index.php/GFN/page/at_a_glance/

Gobierno de El Salvador. (2010). *Plan Quinquenal de Desarrollo 2010 - 2014* (2da ed.). San Salvador: Gobierno de El Salvador.

HC. (2009). *Huella de carbono*. Recuperado de: <http://www.huellacarbono.es/>

Herrera, A. (2010). *Huella ecologica*. Recuperado de: <https://anitaherrera1992.wordpress.com/2010/01/13/huella-ecologica/>

Herva M., Franco A., Ferreiro S., Alvarez A., Roca E. (2008). *An approach for the application of the Ecological Footprint as environmental indicator in the textile sector*. Journal of Hazardous Materials 156:478-487.

Index Mundi 1. (2014). *Gasolina reformulada Precio Diario*. Recuperado de: <http://www.indexmundi.com/es/preciosdemercado/mercancia=fueloil&meses=120>

Index Mundi 2. (2014). *Gasolina Precio Diario*. Recuperado de: <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=gasolina>

Index Mundi 3. 2014. *Gasolina reformulada Precio Diario*. Recuperado de: <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=gasolina-reformulada>

- Infinita Renovables. (2010). *Informe Sectorial 2010*. Informe anual, Castellón.
- Ingenio La Cabaña. (2011). *Informe Progreso*. Ingenio La Cabaña S.A. San Salvador, El Salvador.
- Jimenez, P. (2011). *Columna destrozadora*. Recuperado de: <http://www.scribd.com/doc/75246572/Columna-destrozadora>
- Kac, A. (2005). *Método ácido base para producir biodiesel*. Japón. Recuperado de: http://journeytoforever.org/es/biodiesel_aleksnueva.html#easymeth;
- LaGeo. (2013). *Centrales*. El Salvador. Recuperado de: <http://www.lageo.com.sv/?cat=8&title=Centrales&lang=es>
- Larosa, R .J. (2001). *Proceso para la produccion de biodiesel*. Argentina. Recuperado de: http://www.zoetecnocampo.com/Documentos/bodie_lar/bodie_lar.htm
- Lefèvre, A. y Ramírez, M. (2010). *Primera aproximación a las oportunidades y amenazas de los biocombustibles en centroamérica*. Fundación para el Desarrollo. San Salvador, El Salvador.
- Legrand, F. (2011). *Las dos tesis de la sostenibilidad*. Recuperado de: <http://efectosostenible.com/2012/11/tesis-sostenibilidad-desarrollo-humano-paradigma/>
- Leonel, Andrés & Almada, Miguel. (2002). *SAGPyA; Agencia de Desarrollo de Inversiones. 2001. Propiedades del biodiesel*. Recuperado de: <http://www.sagpya.mecon.gov.ar>
- López, B., Campos, M., y Clímaco, L. (2008). *Guía técnica de manejo agronómico y costos de producción del cultivo de higuerillo (Ricinus communis) en los*

sistemas de monocultivo y asocio en zonas de laderas en El Salvador. Programa para la agricultura sostenible en laderas de El Salvador (PASOLAES); facultad de Ciencias Agronómicas; Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador.

Lopez, I. (2012). *Sostenibilidad debil y fuerte y democracia liberativa.* Recuperado de:
http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/16270/tesis_lopez_pardo_2012.pf?sequence=1

Luque, R. (2011). *Biocombustibles líquidos: procesos y tecnologías.* Recuperado de: [http:// Dialnet-BiocombustiblesLiquidos-3794128%20](http://Dialnet-BiocombustiblesLiquidos-3794128%20)

Maciel, C. (2012). *Biocombustibles.* Recuperado de:
http://www.economia.unam.mx/publicaciones/econinforma/pdfs/359/04carlo_salvarez

MAG. (2014). *Suelos 2008-2009.* Ministerio de Agricultura; Evaluación Agropecuaria. San Salvador, El Salvador.

MAG. (2013). *Recopilación de información sobre caña de azúcar en El Salvador. Zafra 2012-2013.* División de Estadísticas Agropecuarias. San Salvador, Santa Tecla.

Magdalena, I. (2012a). *El proceso de la fabricacion de azucar.* Recuperado de:
http://imsa.com.gt/sitio/proceso_azucar.pdf

Magdalena, I. (2012b). *El proceso del alcohol.* Recuperado de:
http://imsa.com.gt/sitio/proceso_alcohol.pdf

Manzano, R. (2014). *Clasificación y tratamiento de residuos sólidos en el MIDES, consulta técnica.* San Salvador, El Salvador.

- MARN. (2011). *Evaluación ambiental estratégica de contexto y lineamientos para una política de biocombustibles en El Salvador*. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. San Salvador, El Salvador.
- Martínez, A., Ponce, P. & Reyes, L. (2007). *Diseño del proceso químico a escala de laboratorio para la producción de biodiesel a partir de la grasa de pollo*. Trabajo de graduación, Universidad de El Salvador, San Salvador.
- Martínez, B., Bonilla, J. y Zamarripa, A. (2011). *Calidad agroindustrial del aceite de higuierilla (Ricinus communis L.) para la producción de bioenergéticos*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación; México Distrito Federal, México.
- Medina, D. (2013). *Biocombustibles*. Recuperado de: <https://quimica-biologia-12-13.wikispaces.com/Biocombustibles>
- Mercado Mata C. F. (2006). *Rendimiento de etanol y producción de vinaza con cuatro sustratos para la fermentación de melaza con Saccharomyces cerevisiae*. Universidad Zamorano; Honduras.
- MIDES. (2014). *Disposición final en el relleno sanitario*. Manejo integral de Desechos Sólidos para El Salvador. Recuperado de: <http://www.mides.com.sv/disposicion.html>
- Miliarium. (2003). *Indicadores*. Recuperado de: <http://www.miliarium.com/Proyectos/Agenda21/Anejos/Indicadores/indicadores1.asp>
- MINEC. (2009a). *Revisión regulatoria del sector energético y ordenamiento institucional en el mercado de combustibles*. Informe I – Diagnóstico e Identificación de Aspectos Clave. San Salvador, ES: Ministerio de Economía.

- MINEC. (2009b). *Revisión regulatoria del sector energético y ordenamiento institucional en el mercado de combustibles*. Informe II – Mapa institucional futuro y lineamientos de implementación. San Salvador, ES: Ministerio de Economía.
- MINEC. (2011). *Propuesta de proceso de establecimiento de precios de comercialización de etanol y biodiesel dentro del mercado salvadoreño*. Informe de consultoría, Consejo Nacional de Energía, San Salvador.
- Moore, D. (2011). *Huella ecológica de Quito*. Recuperado de: http://footprintnetwork.org/images/article_uploads/Huella_Ecol%C3%B3gica_Quito_imp_28_sep_11.pdf
- Navarro, J. (2006). *Análisis de viabilidad económica de biocombustibles de cuarta generación*. Recuperado de: <http://www.revistavirtualpro.com/biblioteca/analisis-de-viabilidad-economica-de-biocombustibles-de-cuarta-generacion>
- OCDE-FAO. (2008). *Perspectivas de la agricultura: 2008 – 2017*. Resumen en español. Cuarta edición. Recuperado de: <http://www.oecd.org/trade/agricultural-trade/40713555.pdf>
- OEI. (2010). *La sostenibilidad o sustentabilidad como revolución cultural, tecnocientífica y política*. Recuperado de: <http://www.oei.es/decada/accion.php?accion=1>
- ONU. (1987). *Nuestro futuro común*. Nairobi: General.
- Paternoster, A. (2006). *Herramientas para medir la sostenibilidad corporativa*. Recuperado de: http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/13644/1/PFM_Agustin_Paternoster.pdf

Programa Hemisférico en Agroenergía y Biocombustibles. (2010). *Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II Biodiesel / IICA*. San José, C.R.: IICA.

Ramezani, K., Rowshanzamir, S. y Eikani, M. (2010). *Castor oil transesterification reaction: A kinetic study and optimization of parameters*. Fuel Cell Research Laboratory, Centro de Investigación Verde, Irán Universidad de Ciencia y Tecnología, Teherán, Irán.

Ramirez, M. (2010). *Renovables verdes*. Recuperado de: <http://www.renovablesverdes.com>

RES. (2011). *Cálculo de huella ecológica*. Recuperado de: <http://www.ecointeligencia.com/2011/03/calculo-huella-ecologica/>

Rivas, S. (2007). *Política y Programas de Fomento de los Biocombustibles en El Salvador*. Ministerio de Economía. El Salvador. Recuperado de: <file:///G:/TESIS%20H.E/CAPITULO%20I/Salvador Rivas Biocom.pdf>

RTCA. (2006). *Biocombustibles. Biodiesel (B100) y sus mezclas con Aceite combustible diesel. Especificaciones*. Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.43:06. Costa Rica.

RV. (2011). *Biocombustibles*. Recuperado de *Biocombustibles*: <http://www.renovablesverdes.com/biocombustibles-de-primera-generacion/>

Samayoa, M. (2008). *Guía técnica del cultivo de tempate *Jatropha Curcas L.** Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal CENTA; Ministerio de Agricultura y Ganadería; El Salvador

- Saravia, M. (2010). *Evaluación de la utilización de los recursos en la producción de tablero aglomerado aplicando huella ecológica y análisis exergético*. Departamento de Enxeñaría Química; Universidad de Santiago de Compostela; Santiago de Compostela; Galicia, España.
- Saval, S. (2012). *Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro*. BioTecnología, 16(2).
- Serrano, J.E. (1983). *Alternativas del Procesamiento en el Desarrollo de Agro-Industrias en El Salvador*. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador.
- Singh, D. (2009). *Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review*. Escuela de Estudios Energéticos y ambientales de la Universidad de Devi Ahilya; Madhya Pradesh, India.
- Sun Energy Corp. El Salvador. (2008). *Utilización de Aceites Vegetales Reciclados para la Producción de Biodiesel en El Salvador*. Proyecto. Santa Ana, El Salvador. Recuperado de: <http://biodiesel-elsalvador.blogspot.com/>
- TABACAL AGROINDUSTRIA. (2012). *Elaboración de alcohol etílico*. Argentina: Buenos Aires.
- Tecnologías limpias Colombia. (2014). *Proceso de producción*. Recuperado de: http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/313101/313101_frames22.htm
- Tecnologías limpias. (2004). *Alternativas tecnológicas ambientalmente sanas*. Recuperado de: http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/313101/313101_alt.htm

- Torres, D. (2010). *Automatización y control de un proceso de destilación de alcohol crudo y etílico por medio de un pac controllogix, con redundancia en control y comunicación, usando rslogix 5000 v16 e intouch 10.0*. Recuperado de: <https://www.google.com/sv/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.dspace.espol.edu.ec%2Fbitstream%2F123456789%2F19487%2F3%2FDIAPOSITIVAS.pptx&ei=dijTU7k95ZryAfCwgKgB&usq=AFQjCNFuj5JzBIUbl5vNAzbm-tu5Q-paAA>
- UBV. (2007). *Biocombustibles de Primera, Segunda y Tercera Generación*. Recuperado de: <http://www.dforceblog.com/2012/12/19/biocombustibles-de-primera-segunda-y-tercera-generacion/>
- Umaña, R. (2014). Densidad API. Planta Schafick Jorge Handal; Alba Petróleos de El Salvador. Acajutla, El Salvador
- UNESA. (2006). *La huella ecológica de la electricidad*. Recuperado de: <http://www.unesa.net/unesa/html/sabereinvestigar/largoviaje/huellaecologica.htm>
- Vargas, M. (2007). *Biodiesel*. Dirección de Ahorro de Energía en el Transporte, México D.F.
- WFN. (2011). *Huella hidrica*. Recuperado de: <http://www.huellahidrica.org/?page=files/home>
- Willstedt, H. (2009). *Econoticias*. Recuperado de: <http://www.ecoticias.com/biocombustibles/25985/Biocombustibles-de-segunda-generacion>.

Zaratuste. (2013). *Bioetanol*. Recuperado de:
<http://www.cienciabizarra.com/2013/05/verde-que-te-quieropolietileno.html>

Zelaya, J.E., (2007). *Evaluación de materiales vegetales y residuales oleaginosos para la producción de biodiesel en El Salvador*. Tesis de grado, Universidad de El Salvador.

Zepeda, E.R. (2012). *Propuesta de alternativas para la reducción de pérdidas de sacarosa en un ingenio azucarero*. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador.

Zuloeta, P. (2008). *Desarrollo del proceso de fermentación alcohólica de fruta para la obtención de aguardientes*. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.

ANEXO 1

Procesos productivos de DB Y BE a partir de las tres materias primas principales

- **Biodiesel**

El BD producido, presenta las propiedades que son importantes para su uso como alternativa al diesel dentro de ellas las más importantes son las mostradas en la Tabla A1-1.

Tabla A1-1 Propiedades de BD de diferentes materias primas

PROPIEDAD	Unidades	BD HIGUERILLO ¹³	BD MANI ¹⁴	BD TEMPATE ¹⁵
Densidad a 15 °C	g/ml	0.922	0.883	0.875
Viscosidad	mm ² /s	15.17	4.9	4.84
Poder calorífico	MJ/kg	37.9	37.4	37.2
Número de Cetano	-	51	54	51.6
Punto de inflamabilidad	°C	190.7	176	161.85
Punto de fluidez	°C	-45	4	-6.15
Punto de turbidez	°C	-23	5	10.2

Fuente: Elaboración propia, basada en Ramezani K., 2010, Singh S.P. 2010 y Balat, 2010.

Basados en la comparación del poder calorífico que es la característica más importante para su selección y utilización, se puede ver (Tabla 4.3) el mejor BD es el de higuerrillo seguido del de maní y por ultimo del tempate. Seguidamente del poder calorífico está el número de cetano, el cual entre más elevado es menor que

¹³ Basado en Ramezani K., 2010

¹⁴ Basado en Singh S.P., 2010

¹⁵ Basado en Balat, 2011

el retraso de la ignición y mejor es la calidad de combustión, por el cual el BD más conveniente es el de maní seguido por el tempate e higuierillo respectivamente.

En cuanto a la viscosidad, el mejor BD es el producido a través de tempate, el producido a través de higuierillo es más denso que el resto y es menos favorable en la inyección del motor ya que puede obstruirlo; en cuanto al punto de inflamación, aspecto importante para el almacenamiento de los combustibles, el BD proveniente de tempate es el más inseguro de almacenar.

- **Bioetanol**

Para lograr producir BE a partir de los tres materiales importantes descritos en la Figura A1-1, es necesario darles un pre-tratamiento, como son reducción de tamaño en seco o en húmedo, y luego reducirlo a los azúcares, para al final fermentar para obtener el BE.

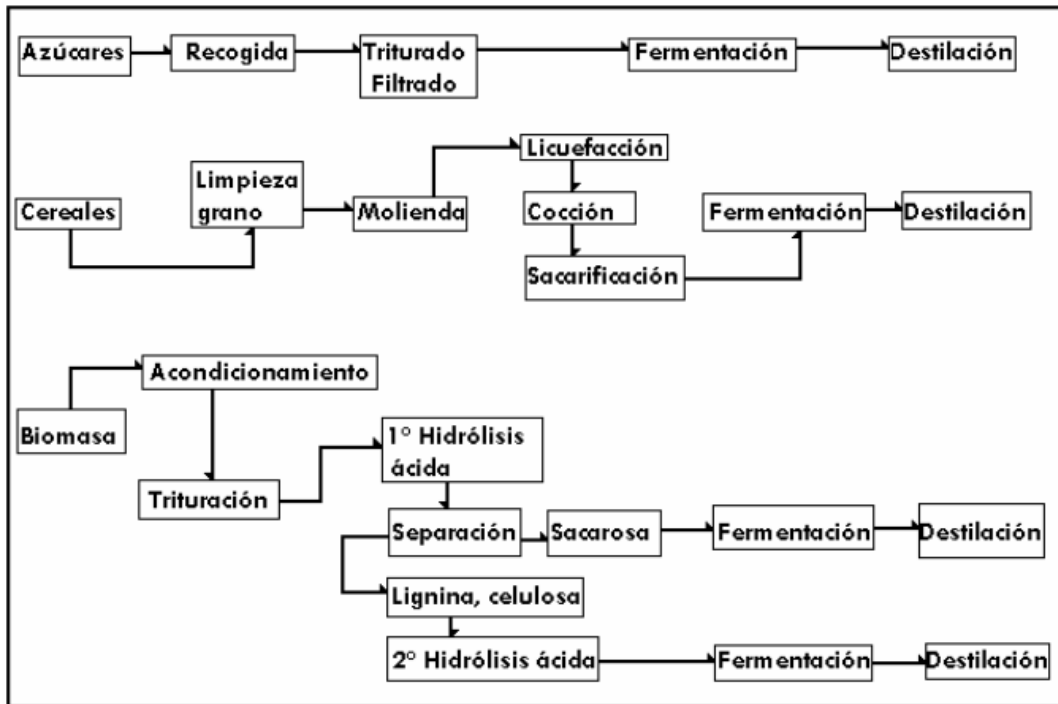


Figura A1- 1 Diagrama de flujo de proceso de fabricación de BE

Fuente: Zelaya (2007).

ANEXO 2

Balance de materia para la producción de BD en El Salvador

En base a los parámetros operativos mostrados en BRC (2008):

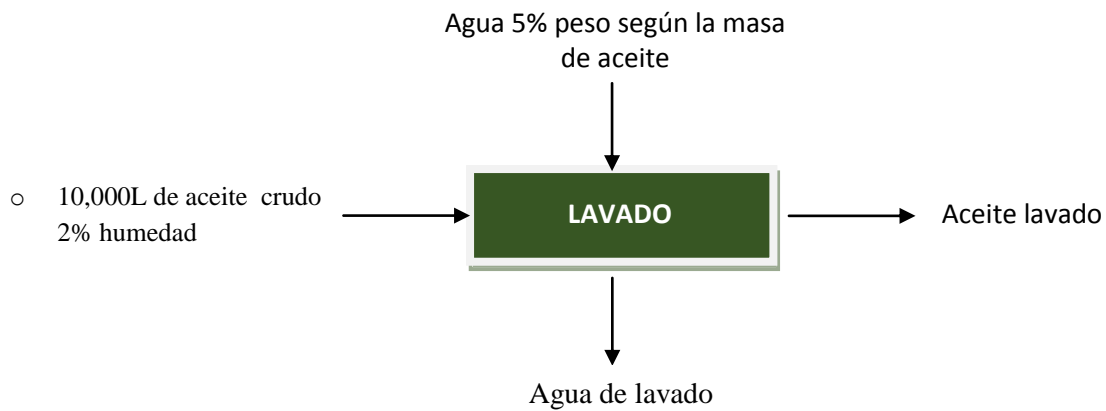
- Capacidad nominal de planta¹⁶ 3000 litros BD/12 horas con aceite crudo que cumpla los parámetros mínimos de calidad (ver Tabla 5-1) siempre y cuando no hay Transesterificación ácida (TEA).
- Un lote entero tiene una duración aproximadamente de 5 a 6 horas cuando no hay TEA y de entre 6 a 7 horas cuando hay TEA.
- La producción nominal de la planta se alcanza cuando se trabaja con aceites de alta calidad; es decir, aceites que tengan menos del 2% de AGL.
- Los reactivos requeridos para la producción de BD en El Salvador se especifican en la Tabla 5-2.
- La secuencia de operaciones son desarrolladas como lo muestra el diagrama de proceso que se ilustra en la Figura 4.1.

BASE DE CÁLCULO: 3,000L de BD en 12 horas para ejemplificar el balance de materia se hace utilizando como referencia la producción a base de aceite de maní.

- **BALANCE DE MASA EN LA ETAPA DE LAVADO**

El aceite que ingresa a la planta es aceite crudo por lo que es necesario lavarlo y decantarlo durante un día, se tiene:

¹⁶ Al referirse a planta, se hace a la actual y única planta instalada en El Salvador del CENTA, los cálculos desarrollados se hacen en base a que dicha planta puede llegar a cubrir la producción nacional.



La masa de aceite entrante es:

Masa de aceite crudo = Volumen de aceite crudo × Densidad del aceite crudo a 20°C

$$Masa\ de\ aceite\ crudo = 3m^3 \times \frac{925.8Kg}{1m^3} = 2777.4Kg$$

De esta masa el 2% corresponde a agua y 98% de aceite:

$$Masa\ de\ aceite = Masa\ de\ aceite\ crudo \times 0.98$$

$$Masa\ de\ aceite = 2777.4Kg \times 0.98 = 2721.95Kg$$

$$Masa\ de\ agua = Masa\ de\ aceite\ crudo \times 0.02$$

$$Masa\ de\ agua = 2777.4Kg \times 0.02 = 55.55kg$$

La masa de agua entrante para lavado es:

$$Masa\ de\ agua = \%Agua\ para\ desgomado \times Masa\ de\ aceite$$

$$Masa\ de\ agua = 2721.95Kg \times 5\% = 136.10kg$$

Por conservación de masa se tiene:

masa que entra = masa que sale

*Masa de aceite + masa de agua en aceite masa de agua para lavado
= masa de agua + masa de aceite*

La masa de aceite que entra es la misma que sale, en el caso de la masa de agua que sale es la sumatoria de la masa de agua que entró en el aceite crudo más el agua de lavado:

Masa de agua saliendo = Masa de agua en aceite + masa de agua de lavado

Masa de agua saliendo = 55.55kg + 136.10kg = 191.65Kg

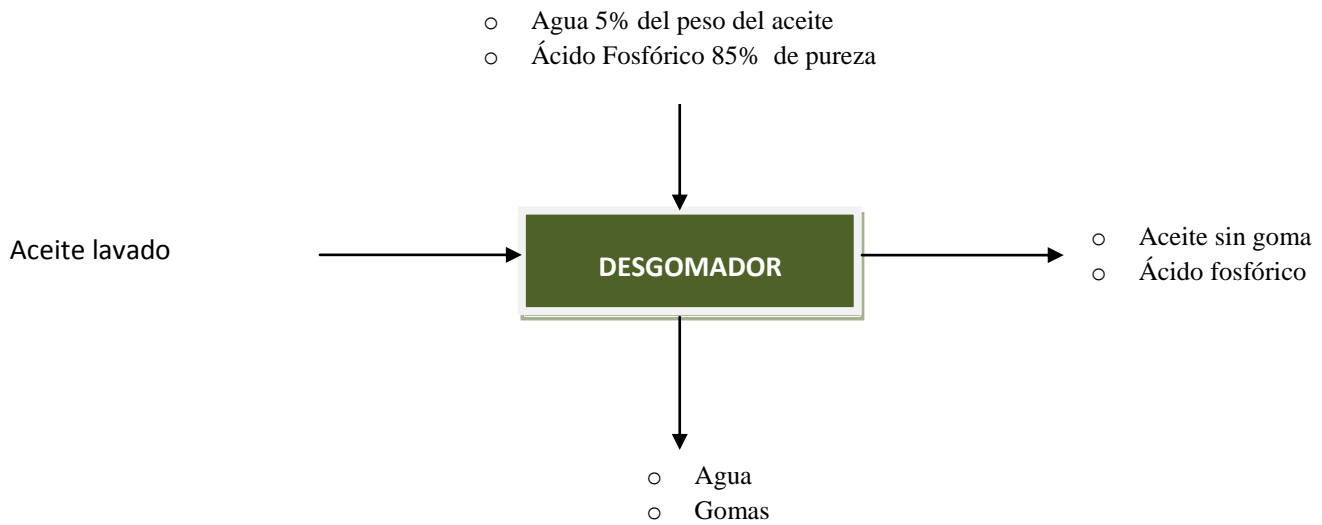
Se completa el siguiente balance:

Tabla A2-1. Balance de masa en el proceso de lavado

Concepto	Entrada (Kg)	Salida(Kg)
Aceite crudo	2721.95	
Aceite lavado	55.55	
Agua de aceite	136.10	
Agua para lavado		191.65
Agua		2721.95
TOTAL	2913.60	2913.60

Fuente: Elaboración propia.

- BALANCE DE MASA EN LA ETAPA DE DESGOMACIÓN



La inyección de Ácido Fosfórico es del 0.1% con respecto al peso del aceite, además, para efectos del balance de masa, se tiene considerado que el máximo de materia insaponificable (2%) precipita para formar gomas.

Se plantea el siguiente balance de masa:

masa que entra = masa que sale

$$M_{aceite} + M_{agua\ pura} + M_{agua\ en\ A.F} + M_{A.Fosfórico} = M_{aceite\ sin\ goma} + M_{gomas} + M_{A.Fosfórico} + M_{agua}$$

$$M_{agua\ pura} = 2721.95Kg \times 0.05 = 136.10Kg$$

$$M_{agua\ en\ A.F} = 0.001 \times 0.15 \times 2721.95Kg = 0.41Kg$$

$$M_{A.Fosfórico} = 0.001 \times 0.85 \times 2721.95Kg = 2.31Kg$$

$$M_{gomas} = 0.02 \times 2721.95Kg = 54.44Kg$$

$$M_{aceite\ sin\ goma} = 2721.95Kg - 54.44Kg = 2667.51Kg$$

$$M_{agua\ salida} = 136.10Kg + 0.41Kg = 136.51kg$$

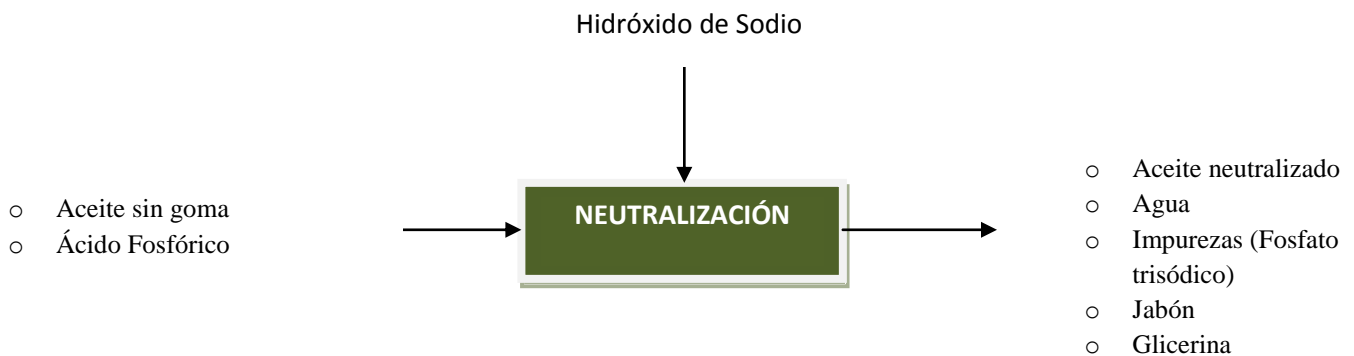
Se completa el siguiente balance:

Tabla A2-2. Balance de masa en el proceso de desgomado

Concepto	Entrada (Kg)	Salida(Kg)
Aceite de lavado	2721.95	
Agua pura	136.10	
Agua en A. Fosfórico	2.31	2.31
Ácido Fosfórico	0.41	
Goma		54.44
Aceite sin goma		2667.51
Agua		136.51
TOTAL	2860.77	2860.77

Fuente: Elaboración propia

- **BALANCE DE MASA EN EL PROCESO DE NEUTRALIZACIÓN**



masa que entra = masa que sale

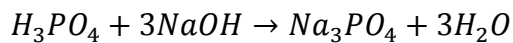
$$M_{A.Fosfórico} + M_{Aceite} + M_{NaOH} = M_{impurezas} + M_{agua} + M_{aceite}$$

Nota: las impurezas que se hace mención es al precipitado que se genera por la reacción de neutralización.

La cantidad de Hidróxido de Sodio que ingresa debe ser la necesaria tanto para neutralizar el Ácido Fosfórico ingresado en el proceso de desgomado como también el necesario para reaccionar con los AGL y producir jabón, por lo cual:

- Neutralización de Ácido Fosfórico

La reacción de neutralización que se lleva a cabo es la siguiente:



La cantidad de Hidróxido de Sodio requerida es la siguiente:

$$2.31Kg H_3PO_4 \times \frac{1 Kg mol de H_3PO_4}{98 kg de H_3PO_4} \times \frac{3 Kg mol de NaOH}{1 Kg mol de H_3PO_4} \times \frac{40 Kg de NaOH}{1 Kg mol de NaOH} = 2.83Kg$$

El agua que saldrá producto de la reacción de neutralización es la siguiente:

$$2.31Kg H_3PO_4 \times \frac{1 Kg mol de H_3PO_4}{98 kg de H_3PO_4} \times \frac{3 Kg mol de NaOH}{1 Kg mol de H_3PO_4} \times \frac{18 Kg de NaOH}{1 Kg mol de NaOH} = 1.28Kg$$

La cantidad de impurezas (Na_3PO_4) es la siguiente:

$$2.31Kg H_3PO_4 \times \frac{1 Kg mol de H_3PO_4}{98 kg de H_3PO_4} \times \frac{1 Kg mol de Na_3PO_4}{1 Kg mol de H_3PO_4} \times \frac{164 Kg de Na_3PO_4}{1 Kg mol de NaOH} = 3.87Kg$$

- Neutralización de los AGL

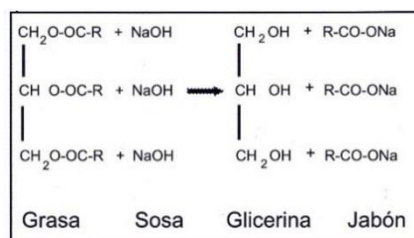


Figura A2-1. Reacción de producción de jabón

Se considera que el aceite que ingresa a la planta debe de tener como mínimo un 2% peso de AGL, por lo cual se considera que este porcentaje de materia reaccionara para formar jabón y glicerina. En la Tabla A2.7 se presenta el peso molecular promedio del aceite y así también el peso molecular del jabón que se ha formado, producto de la neutralización del AGL; por lo cual el jabón que se genera es el siguiente:

La masa de jabón generada en la reacción de saponificación es la siguiente:

$$2\% \times 2667.51Kg \text{ aceite} \times \frac{1kgmol \text{ de aceite}}{868.8071Kg \text{ de aceite}} \times \frac{3 kgmoles \text{ de jabón}}{1kgmol \text{ de aceite}} \times \frac{296.6896 Kg \text{ de jabón}}{1 kg mol \text{ de jabón}} = 54.74Kg$$

La masa de glicerina que se genera producto de la reacción de saponificación es la siguiente:

$$2\% \times 2667.51Kg \text{ de aceite} \times \frac{1kgmol \text{ de aceite}}{868.8071Kg \text{ de aceite}} \times \frac{1 kgmoles \text{ de glicerina}}{1kgmol \text{ de aceite}} \times \frac{92.09382Kg \text{ de glicerina}}{1 kg mol \text{ de glicerina}} = 5.66kg$$

La masa de Hidróxido de Sodio requerida para neutralizar los AGL es la siguiente

$$2\% \times 2667.51Kg \text{ de aceite} \times \frac{1kgmol \text{ de aceite}}{868.8071Kg \text{ de aceite}} \times \frac{3 Kg mol \text{ de NaOH}}{1kgmol \text{ de aceite}} \times \frac{40 Kg \text{ de NaOH}}{1 Kg mol \text{ de NaOH}} = 7.37Kg$$

Se completa el siguiente balance:

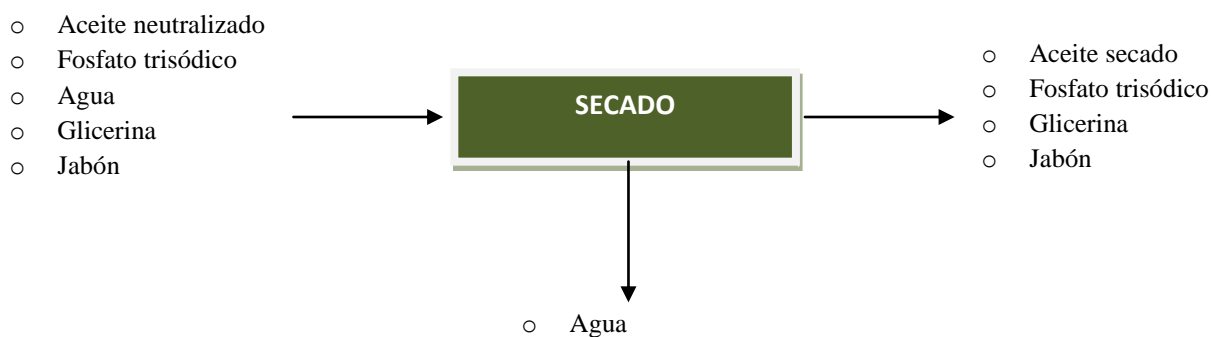
Tabla A2-3. Balance de masa en el proceso de neutralización

Concepto	Entrada (Kg)	Salida(Kg)
Aceite sin goma	2667.51	
Aceite neutralizado	2.31	
Ácido Fosfórico	2.83	
Hidróxido de Sodio A.F		1.28
Fosfato trisódico		3.87
Agua		2614.16
Jabón		54.74

Concepto	Entrada (Kg)	Salida(Kg)
Glicerina	7.37	
Hidróxido de Sodio AGL		5.66
TOTAL	2680.03	2679.71

Fuente: Elaboración propia

- BALANCE DE MASA EN EL PROCESO DE SECADO



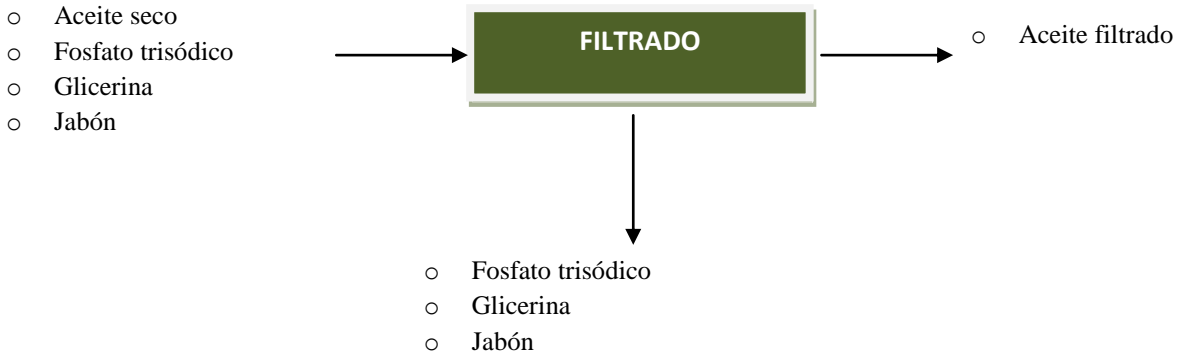
Esta etapa consiste únicamente en retirar el agua del aceite neutralizado, por lo cual el balance de masa queda de la siguiente manera:

Tabla A2-4. Balance de masa en el proceso de secado

Concepto	Entrada (Kg)	Salida(Kg)
Aceite neutralizado	2614.16	
Aceite secado		2614.16
Fosfato trisódico	3.87	3.87
Agua	5.66	5.66
Jabón	54.74	54.74
Glicerina	1.28	1.28
TOTAL	2679.71	2679.71

Fuente: Elaboración propia

- BALANCE DE MASA EN LA ETAPA DE FILTRADO



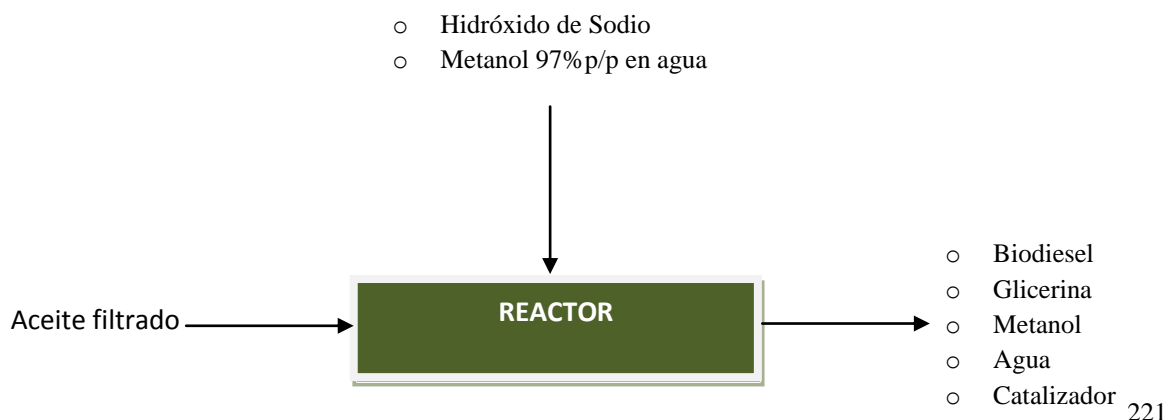
Esta etapa consiste en retirar las impurezas que se generaron en la etapa de neutralización; es decir, eliminar el precipitado de Fosfato Trisódico, el jabón y la glicerina, por lo cual el balance queda de la siguiente manera:

Tabla A2-5. Balance de masa en el proceso de filtrado

Concepto	Entrada (Kg)	Salida(Kg)
Aceite seco	2614.16	
Aceite filtrado		2614.16
Fosfato trisódico	3.87	3.87
Jabón	5.66	5.66
Glicerina	54.74	54.74
TOTAL	2678.43	2678.43

Fuente: Elaboración propia

- BALANCE DE MASA EN LA ETAPA DE TRANSESTERIFICACIÓN



Antes de ingresar al reactor se diluye el catalizador (Hidróxido de Sodio) y el metanol, basando en las siguientes consideraciones:

Para que la reacción de transesterificación se desarrolle de forma eficiente se recomienda que el metanol ingrese en exceso al reactor por lo cual se recomienda una relación molar de 6:1 (Ahmad, 2008), (Fernández, 2012), (BCR, 2008), (Singh, 2009) y (Balat, 2010). Además la proporción del catalizador es 1% peso respecto al peso de aceite ingresado al reactor (Ahmad, 2008) y (Balat, 2010).

De acuerdo a la estequiometría de la reacción, 1 mol de aceite reacciona para producir 3 moles de biodiesel:

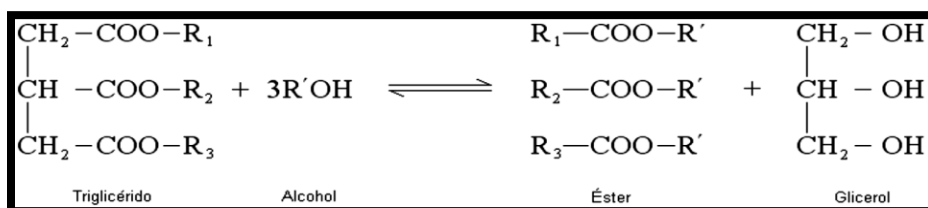


Figura A2-2. Reacción de transesterificación

Para realizar el balance de masa, se considera que la reacción tiene una eficiencia del 100% de conversión.

La composición química en cuanto a porcentaje peso de los ácidos grasos presentes en el aceite de maní se muestran:

Tabla A2-6 Composición del aceite de maní según los ácidos grasos (%peso)

Ácido graso	%peso
Palmítico (C16:0)	11.0%
Esteárico (C18:0)	2.0%
Oleico (C18:1)	48.0%
Linoleico (C18:2)	32.0%

Linolenico (C18:3)	1.0%
Araquídico (C20:0)	1.0%
Behénico (22:0)	2.0%
Lignocérico (24:0)	1.0%
Total	100%

Fuente: Adaptada de Singh (2009)

Para poder determinar el peso molecular del aceite, se considera para efectos de cálculos, que el aceite está constituido únicamente de triglicéridos, por lo cual se determina el peso molecular del triglicérido de cada ácido graso teniendo en cuenta la reacción mostrada en la Figura A2-3, luego de tener el peso molecular de cada uno de los triglicéridos se multiplica por el porcentaje de cada ácido graso en el aceite para establecer un peso molecular promedio del aceite. Para el peso molecular del biodiesel, se procedió a determinar el peso molecular del éster de cada uno de los triglicéridos por el cual está constituido el aceite crudo y luego multiplicado por el porcentaje de cada ácido graso en el aceite para conocer el peso molecular promedio del biodiesel (Ver Figura A2.3). De igual manera se determinó el peso molecular del jabón, completándose de esta manera los datos mostrados en la Tabla A2.7.

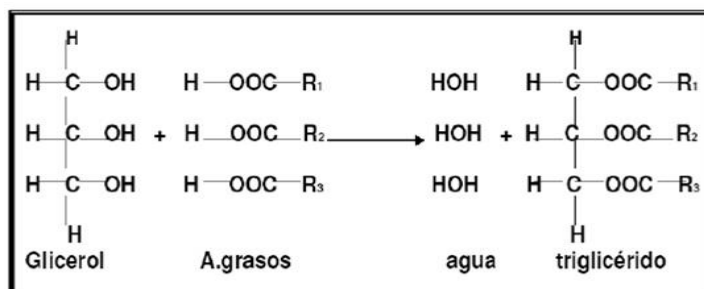


Figura A2-3 Conversión de ácidos grasos en triglicéridos

Tabla A2-7 Peso molecular del aceite crudo de maní y del BD proveniente de aceite de maní

Ácido graso	%peso	Triglicérido del AGL	Peso molecular del triglicérido del AGL	Peso del triglicérido en el aceite	Fórmula química del Jabón del AGL	Peso molecular del jabón del AGL	Peso del jabón en el aceite	Fórmula química del metil-éster del A.G	Peso molecular del metil-éster del AGL	Peso del metil-éster en el biodiesel
Palmítico (C16:0)	11.0%	C51H98O6	807.3202	88.8052	C16H31O2Na	278.4059	30.6246	C17H34O2	270.4507	29.7496
Estearico (C18:0)	2.0%	C57H110O6	891.4797	17.8296	C18H35O2Na	306.4591	6.1292	C19H38O2	298.5038	5.9701
Oleico (C18:1)	48.0%	C57H108O6	889.4638	426.9426	C18H33O2Na	304.4432	146.1327	C19H36O2	296.4879	142.3142
Linoleico (C18:2)	32.0%	C57H106O6	887.4479	283.9833	C18H31O2Na	302.4273	96.7767	C19H34O2	294.4721	94.2311
Linolenico (C18:3)	1.0%	C57H104O6	885.4321	8.8543	C18H29O2Na	300.4114	3.0041	C19H32O2	292.4562	2.9246
Araquídico (C20:0)	1.0%	C63H122O6	975.6392	9.7564	C20H39O2Na	334.5122	3.3451	C21H42O2	326.5570	3.2656
Behénico (22:0)	2.0%	C69H134O6	1059.7987	21.1960	C22H43O2Na	362.5654	7.2513	C22H46O2	342.5994	6.5820
Lignocérico (24:0)	1.0%	C75H146O6	1143.9581	11.4396	C24H47O2Na	390.6185	3.9062	C25H50O2	382.6633	3.8266
TOTAL	98%			868.8071			291.1700			289.1337

Fuente: Adaptada de Singh(2009), Balat(2010) y Bayle(1984)

El balance que se plantea es el siguiente:

masa que entra = masa que sale

$$M_{aceite} + M_{NaOH} + M_{CH_3OH} + M_{agua} \\ = M_{BIODIESEL} + M_{GLICERINA} + M_{CH_3OH SIN REACCIONAR} + M_{agua}$$

La cantidad de BD producido:

$$2614.16Kg \text{ de aceite} \times \frac{1kgmol \text{ de aceite}}{868.8071Kg \text{ de aceite}} \times \frac{3 kgmoles \text{ de biodiesel}}{1kgmol \text{ de aceite}} \times \frac{289.1337 Kg \text{ de biodiesel}}{1 kg \text{ mol de biodiesel}} \\ = 2609.93kg \text{ de biodiesel}$$

La cantidad de glicerina generada es de:

$$2614.16Kg \text{ de aceite} \times \frac{1kgmol \text{ de aceite}}{868.8071Kg \text{ de aceite}} \times \frac{1 kgmoles \text{ de glicerina}}{1kgmol \text{ de aceite}} \times \frac{92.09382Kg \text{ de glicerina}}{1 kg \text{ mol de glicerina}} \\ = 277.10kg$$

La cantidad de metanol que reaccionó es:

$$2614.16Kg \text{ de aceite} \times \frac{1kgmol \text{ de aceite}}{868.8071Kg \text{ de aceite}} \times \frac{3 kgmoles \text{ de metanol}}{1kgmol \text{ de aceite}} \times \frac{32.0400kg \text{ de metanol}}{1 kg \text{ mol de metanol}} \\ = 289.22Kg$$

La cantidad de metanol que ingresó fue de:

$$2614.16Kg \text{ de aceite} \times \frac{1kgmol \text{ de aceite}}{868.8071Kg \text{ de aceite}} \times \frac{6 kgmoles \text{ de metanol}}{1kgmol \text{ de aceite}} \times \frac{32.0400kg \text{ de metanol}}{1 kg \text{ mol de metanol}} \\ = 578.43kg$$

La cantidad de metanol que sale es:

$$Metanol \text{ sale} = 578.43kg - 289.22Kg = 289.22Kg$$

La cantidad de agua ingresa en el metanol es la siguiente:

$$Masa \text{ de agua} = 578.43kg \times 0.03 = 17.35kg$$

La cantidad de catalizador ingresado es:

$$\text{Masa de agua} = 578.43\text{kg} \times 0.03 = 17.35\text{kg}$$

$$\text{Masa del catalizador} = 1\% \times 2614.16\text{Kg de aceite filtrado}$$

$$\text{Masa del catalizador} = 26.14\text{Kg}$$

Se completa el siguiente balance:

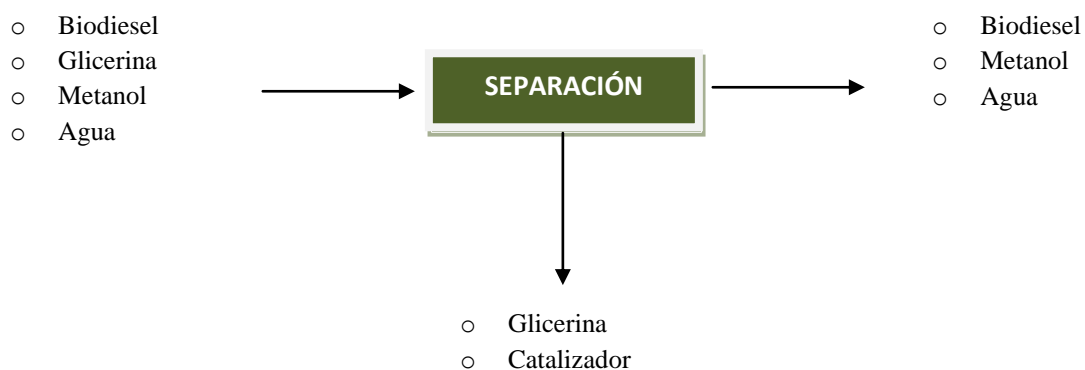
Tabla A2-8 Balance de masa en el proceso de transesterificación

Concepto	Entrada (Kg)	Salida(Kg)
Aceite filtrado	2614.16	
Hidróxido de sodio (catalizador)	26.14	26.14
Metanol	578.43	289.22
Agua	17.35	17.35
Glicerina		277.10
Biodiesel		2609.93
TOTAL	3236.09	3219.74

Fuente: Elaboración propia

En la preparación de la mezcla de catalizador y metanol se está recirculando el metanol que se obtiene de la vaporización, es decir que metanol nuevo que se está ingresando debe ser exactamente el mismo que está reaccionando.

- **BALANCE DE MASA EN LA ETAPA DE SEPARACIÓN**



Esta etapa consiste únicamente en retirar la glicerina generada y el catalizador, por lo cual el balance de masa queda de la siguiente manera:

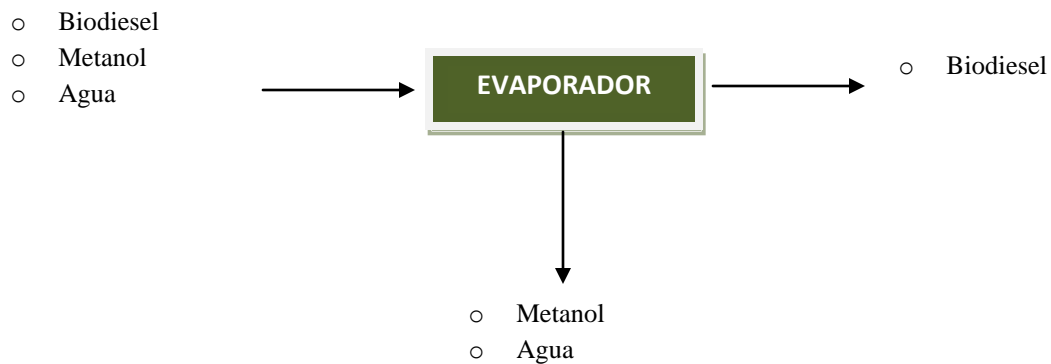
Se completa el siguiente balance:

Tabla A2-9 Balance de masa en el proceso de separación

Concepto	Entrada (Kg)	Salida(Kg)
Hidróxido de sodio (catalizador)	26.14	26.14
Metanol	289.22	289.22
Agua	17.35	17.35
Glicerina	277.10	277.10
Biodiesel	2609.93	2609.93
TOTAL	3219.74	3219.74

Fuente: Elaboración propia

- BALANCE DE MASA EN LA ETAPA DE EVAPORACIÓN



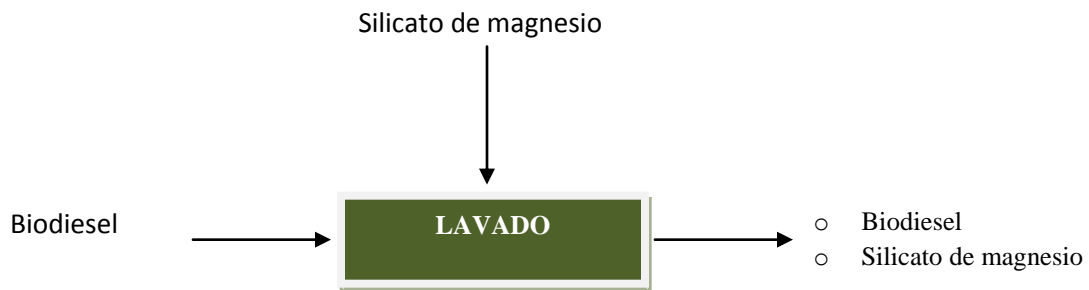
En esta etapa se da la separación de agua y metanol del BD por lo que el balance de masa queda de la siguiente manera:

Tabla A2-10 Balance de masa en el proceso de evaporación

Concepto	Entrada (Kg)	Salida(Kg)
Metanol	289.22	289.22
Agua	17.35	17.35
Biodiesel	2609.93	2609.93
TOTAL	2916.50	2916.50

Fuente: Elaboración propia

- BALANCE DE MASA EN LA ETAPA DE LAVADO



Esta etapa consiste en agregar Silicato de magnesio (4% de la cantidad de biodiesel) para extraer alguna partícula que se arrastró a lo largo del proceso, no ocurre ninguna transformación química.

La masa de Silicato de magnesio a agregar es:

$$\text{Masa de silicato de magnesio} = 4\% \text{masa de biodiesel}$$

$$\text{Masa de silicato de magnesio} = 2609.93 \times 4\% = 104.40Kg$$

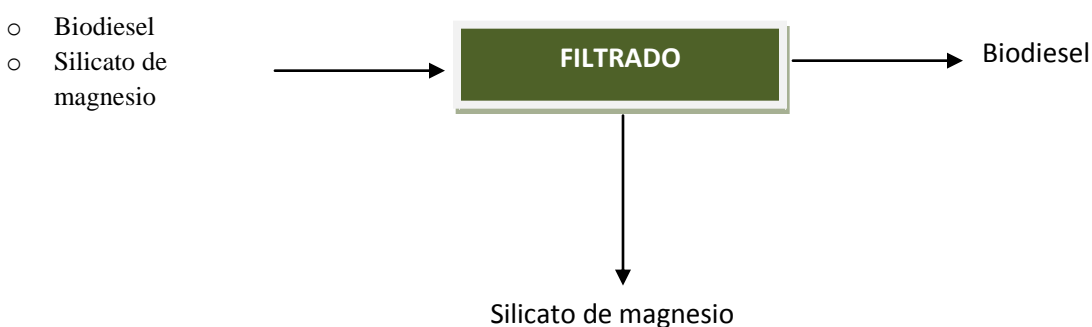
Por lo cual el balance de masa queda de la siguiente manera:

Tabla A2-11 Balance de masa en el proceso de lavado

Concepto	Entrada (Kg)	Salida(Kg)
Silicato de magnesio	104.40	104.40
Biodiesel	2609.93	2609.93
TOTAL	2714.33	2714.33

Fuente: Elaboración propia

- **BALANCE DE MASA EN LA ETAPA DE FILTRADO**



Esta etapa consiste en eliminar el silicato de magnesio agregado para extraer partículas que se han arrastrado en el proceso, pero generalmente, y por las filtraciones anteriores estas partículas retenidas en el proceso son despreciadas.

El Balance de masa queda de la siguiente manera:

Tabla A2-12 Balance de masa en el proceso de lavado

Concepto	Entrada (Kg)	Salida(Kg)
Silicato de magnesio	104.40	104.40
Biodiesel	2609.93	2609.93
TOTAL	2714.33	2714.33

Fuente: Elaboración propia

El balance de masa global que se atribuye al proceso productivo de biodiesel es el siguiente:

Tabla A2-13 Balance de masa global

Concepto	Unidades	Entrada	Salida
Aceite Crudo	Kg	2721.95	
Agua de aceite	Kg	55.55	
Agua de lavado de aceite crudo	Kg	136	191.6475
Ácido Fosfórico	kg	2.3136575	
Agua en Ácido Fosfórico	kg	0.4082925	
Agua para quitar goma	kg	136.0975	136.5057925
Gomas	kg		54.439
Hidróxido de Sodio para neutralizar A.F	kg	2.832837521	
Agua que sale del secado 1	kg		1.275954725
Fosfato trisódico	kg		3.870418475
Metanol	kg	289.2162666	
Hidróxido de Sodio para catalizar	kg	26.1416078	26.1416078
Agua que ingresa en el metanol	kg	17.352976	
Glicerina	kg		277.1018601
Agua del evaporador	kg		17.352976
Jabón	kg		54.7443
Hidróxido de Sodio para neutralizar AGL	kg	7.3682	
Glicerina de etapa de neutralización	kg		5.6551
Silicato de magnesio	kg	104.3972052	104.3972052
Biodiesel	kg		2609.930131
TOTAL	kg	3499.726046	3483.061915

Fuente: Elaboración propia

El balance de masa global del proceso productivo de BD es el siguiente:

Tabla A2-14 Balance de masa global

Concepto	Unidades	Entrada	Salida
Aceite Crudo	kg	2721.95	
Agua	kg	345.51	346.78
Ácido Fosfórico	kg	2.31	
Gomas	kg		54.44
Hidróxido de Sodio	kg	36.34	26.14
Fosfato trisodico	kg		3.87
Metanol	kg	289.22	
Glicerina	kg		282.76
Silicato de magnesio	kg	104.40	104.40
Jabón	kg		54.74
Biodiesel	kg		2609.93
TOTAL	kg	3499.73	3483.06

Fuente: Elaboración propia

De igual forma se realiza el balance de masa para el aceite crudo proveniente de tempate y de higuierillo, teniendo en cuenta de que las propiedades descritas en la Tabla A2.1 corresponden al aceite crudo que ingresa al proceso sin tener en cuenta la naturaleza del mismo (Ver Tabla A2-17 y A2-18). En las Tablas A2-15 y A2-16 se detalla la composición de los aceites de higuierillo y tempate, los pesos moleculares de sus triglicéridos, jabón y BD producido por cada uno aceites.

Tabla A2-15 Peso molecular del aceite crudo de Higuerrillo y del BD proveniente de aceite de Higuerrillo

Ácido graso	%peso	Triglicérido del AGL	Peso molecular del triglicérido del AGL	Peso del triglicérido en el aceite	Fórmula química del Jabón del AGL	Peso molecular del jabón del AGL	Peso del jabón en el aceite	Fórmula química del metil-éster del A.G	Peso molecular del metil-éster del AGL	Peso del metil-éster en el biodiesel
Láurico (C12:0)	0.0%	C39H74O6	639.0013	0.0000	C12H23O2Na	222.2996	0.0000	C13H26O2	214.3443	0.0000
Mirístico (C14:0)	0.0%	C45H86O6	723.1607	0.0000	C14H27O2Na	250.3527	0.0000	C15H30O2	242.3975	0.0000
Miristoleico(C14:1)	0.0%	C45H84O6	721.1449	0.0000	C14H25O2Na	248.3369	0.0000	C15H28O2	240.3816	0.0000
Palmitico (C16:0)	1.1%	C51H98O6	807.3202	8.8805	C16H31O2Na	278.4059	3.0625	C17H34O2	270.4507	2.9750
Palmitoleico (C16:1)	0.0%	C51H96O6	805.3043	0.0000	C16H29O2Na	276.3900	0.0000	C17H32O2	268.4348	0.0000
Estearico (C18:0)	3.1%	C57H110O6	891.4797	27.6359	C18H35O2Na	306.4591	9.5002	C19H38O2	298.5038	9.2536
Oleico (C18:1)	4.9%	C57H108O6	889.4638	43.5837	C18H33O2Na	304.4432	14.9177	C19H36O2	296.4879	14.5279
Linoleic (C18:2)	1.3%	C57H106O6	887.4479	11.5368	C18H31O2Na	302.4273	3.9316	C19H34O2	294.4721	3.8281
Linolenico (C18:3)	0.0%	C57H104O6	885.4321	0.0000	C18H29O2Na	300.4114	0.0000	C19H32O2	292.4562	0.0000
Estearidónico (18:4)	0.0%	C57H102O6	883.4162	0.0000	C18H27O2Na	298.3955	0.0000	C19H30O2	290.4403	0.0000
Araquídico (C20:0)	0.0%	C63H122O6	975.6392	0.0000	C20H39O2Na	334.5122	0.0000	C21H42O2	326.5570	0.0000
Behénico (22:0)	0.0%	C69H134O6	1059.7987	0.0000	C21H43O2Na	350.5547	0.0000	C22H46O2	342.5994	0.0000
Lignocérico (24:0)	0.0%	C75H146O6	1143.9581	0.0000	C24H47O2Na	390.6185	0.0000	C25H50O2	382.6633	0.0000
Ácido ricinoleico	89.6%	C57H104O6	885.4321	793.3471	C18H33O6Na	304.4432	272.7811	C19H36O6	296.4879	265.6532
TOTAL	100%			884.9841			304.1931			296.2378

Fuente: Adaptada de Singh (2009), Balat(2010) y Bayle(1984)

Tabla A2-16 Peso molecular del aceite crudo de Tempate y del BD proveniente de aceite de Tempate

Ácido graso	%peso	Triglicérido del AGL	Peso molecular del triglicérido del AGL	Peso del triglicérido en el aceite	Fórmula química del Jabón del AGL	Peso molecular del jabón del AGL	Peso del jabón en el aceite	Fórmula química del metil-ester del A.G	Peso molecular del metil-ester del AGL	Peso del metil-ester en el biodiesel
Mirístico (C14:0)	1.4%	C45H86O6	723.1607	10.1243	C14H27O2Na	250.3527	3.5049	C15H30O2	242.3975	3.3936
Palmítico (C16:0)	15.6%	C51H98O6	807.3202	125.9420	C16H31O2Na	278.4059	43.4313	C17H34O2	270.4507	42.1903
Palmitoleico (C16:1)	0.0%	C51H96O6	805.3043	0.0000	C16H29O2Na	276.3900	0.0000	C17H32O2	268.4348	0.0000
Esteárico (C18:0)	9.7%	C57H110O6	891.4797	86.4735	C18H35O2Na	306.4591	29.7265	C19H38O2	298.5038	28.9549
Oleico (C18:1)	40.8%	C57H108O6	889.4638	362.9012	C18H33O2Na	304.4432	124.2128	C19H36O2	296.4879	120.9671
Linoleic (C18:2)	32.1%	C57H106O6	887.4479	284.8708	C18H31O2Na	302.4273	97.0792	C19H34O2	294.4721	94.5255
Linolenic0 (C18:3)	1.0%	C57H104O6	885.4321	8.8543	C18H29O2Na	300.4114	3.0041	C19H32O2	292.4562	2.9246
Araquídico (C20:0)	0.4%	C63H122O6	975.6392	3.9026	C20H39O2Na	334.5122	1.3380	C21H42O2	326.5570	1.3062
TOTAL	100%			883.0686			302.2969			294.2621

Fuente: Adaptada de Singh (2009), Balat (2010) y Bayle (1984)

Tabla A2-17 Balance de masa para aceite de Tempate y de Higuerrillo sin TEA

Concepto	Unidades	Higuerrillo		Tempate	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida
Aceite Crudo	kg	2721.95		2721.95	
Agua de aceite	kg	55.55		55.55	
Agua de lavado de aceite crudo	kg	136	191.6475	136.10	191.65
Ácido Fosfórico	kg	2.3136575		2.31	
Agua en Ácido Fosfórico	kg	0.4082925		0.41	
Agua para quitar goma	kg	136.0975	136.505793	136.10	136.51
Gomas	kg		54.439		54.44
Hidróxido de Sodio para neutralizar A.F	kg	2.83283752		2.83	
Agua que sale del secado 1	kg		1.27595473		1.28
Fosfato trisodico	kg		3.87041848		3.87
Metanol	kg	283.929556		284.55	
Hidróxido de Sodio para catalizar	kg	26.1416078	26.1416078	26.14	26.14
Agua que ingresa en el metanol	kg	17.0357734		17.07	
Glicerina	kg		272.036594		272.63
Agua del evaporador	kg		17.0357734		17.07
Jabón	kg		55.0138		54.79
Hidróxido de Sodio para neutralizar AGL	kg	7.2335		7.25	
Glicerina de etapa de neutralización	kg		5.5518		5.56
Silicato de magnesio	kg	105.007081	105.007081	104.53	104.53
Biodiesel	kg		2625.17702		2613.33
TOTAL	kg	3494.59732	3493.70227	3494.79	3481.79

Fuente: Elaboración propia

Tabla A2-18 Balance de masa global para Higuerrillo y Tempate

Concepto	Unidades	Higuerrillo		Tempate	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida
Aceite Crudo	Kg	2721.95		2721.95	
Agua	Kg	345.19	346.47	345.23	346.50
Ácido Fosfórico	Kg	2.31		2.31	
Gomas	Kg		54.44		54.44
Hidróxido de Sodio	Kg	36.21	26.14	36.22	26.14
Fosfato trisódico	Kg		3.87		3.87
Metanol	Kg	283.93		284.55	
Glicerina	Kg		277.59		278.19
Silicato de magnesio	Kg	105.01	105.01	104.53	104.53
Jabón	Kg		55.01		54.79
Biodiesel	Kg		2625.18		2613.33
TOTAL	Kg	3494.60	3493.70	3494.79	3481.79

Fuente: Elaboración propia

Si el aceite ingresado a la planta presenta un porcentaje de AGL del 4% o más es necesario realizar antes de la neutralización una Transesterificación ácida (TEA) la cual consiste en convertir los AGL en BD y glicerina pero en medio ácido, utilizando ácido sulfúrico, para lo cual se realiza la misma secuencia de etapas antes descritas, completándose el balance de masa que se muestra en la Tabla A2-19 y A2-20.

Tabla A2-19 Balance de materia con TEA

Concepto	Unidades	Maní		Tempate		Higuerillo	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Aceite Crudo	kg	2721.9500		2721.95		2721.95	
Agua de aceite	kg	55.5500		55.55		55.55	
Agua de lavado de aceite crudo	kg	136.0975	191.6475	136.10	191.65	136.10	191.65
Ácido Fosfórico	kg	2.3137		2.31		2.31	
Agua en Ácido Fosfórico	kg	0.4083		0.41		0.41	
Agua para quitar goma	kg	136.0975	136.5058	136.10	136.51	136.10	136.51
Gomas	kg		54.4390		54.44		54.44
Ácido Sulfúrico	kg	37.3825		37.38		37.38	
Agua en ácido sulfúrico	kg	0.7629		0.76		0.76	
Metanol para TEA	kg	12.4033		12.21		12.11	
Agua de TEA	kg		8.1090		7.99		7.94
BD de TEA	kg		111.9288		112.10		112.00
Agua en metanol para TEA	kg	0.3721		0.37		0.36	
Sulfato de Sodio	kg		54.1381		54.14		54.14
Hidróxido de Sodio para neutralizar	kg	33.3223		33.32		33.32	
Agua que sale del secado 1	kg		15.0089		15.01		15.01
Fosfato trisódico	kg		3.8704		3.87		3.87

Concepto	Unidades	Maní		Tempate		Higuerillo	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Metanol	kg	283.3139		278.74		278.14	
Hidróxido de Sodio para catalizar	kg	25.6081	25.6081	25.61	25.61	25.61	25.61
Agua que ingresa en el metanol	kg	16.9988		16.72		16.69	
Glicerina	kg		271.4467		267.06		266.48
Agua del evaporador	kg		16.9988		16.72		16.69
Silicato de magnesio	kg	102.2667	102.2667	102.40	102.40	102.86	102.86
Biodiesel	kg		2556.6663		2559.99		2571.60
TOTAL	kg	3564.8475	3548.6341	3559.93	3547.49	3559.66	3558.80

Fuente: Elaboración propia

Tabla A2.20. Balance de materia global con TEA

Concepto	Unidades	Maní		Tempate		Higuerillo	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Aceite Crudo	kg	2721.95		2721.95		2721.95	
Agua	kg	346.29	368.27	346.01	367.88	345.97	367.79
Ácido Sulfúrico	kg	37.38		37.38		37.38	
Ácido Fosfórico	kg	2.31		2.31		2.31	
Gomas	kg		54.44		54.44		54.44
Hidróxido de Sodio	kg	58.93	25.61	58.93	25.61	58.93	25.61
Sulfato de Sodio	kg		54.14		54.14		54.14
Fosfato trisódico	kg		3.87		3.87		3.87
Metanol	kg	295.72		290.94		290.25	
Glicerina	kg		271.45		267.06		266.48
Silicato de magnesio	kg	102.27	102.27	102.40	102.40	102.86	102.86
Biodiesel	kg		2668.60		2672.09		2683.61
TOTAL	kg	3564.85	3548.63	3559.93	3547.49	3559.66	3558.80

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3

Balance de materia para la producción de BE en El Salvador

En base a los datos publicados por el Ministerio de Agricultura y Ganadería acerca de la recopilación de información sobre caña de azúcar en El Salvador zafra 2012/2013 y bajo los seguimientos de publicaciones sobre el proceso de producción de BE (BID-CEL, 2007; TABACAL Agroindustria, 2012); (Mercado, 2006); (Garzón y Hernández, 2009); (Serrano, 1983); (Erazo, Cuellar y Vaquerano, 1994); (Berrios y Castro, 1998); (Zepeda, 2012) y (Tecnologías limpias Colombia, 2014) se desarrolla el balance de materia considerando los siguientes datos de entrada:

- Actualmente El Salvador cuenta con 6 ingenios los cuales son los productores de melazas; sin embargo, solamente uno (Ingenio La Cabaña) es el que posee dentro de sus operaciones la producción de etanol a partir de este subproducto proveniente de la fabricación de azúcar. Por tal razón se destino el balance de materia para dicho ingenio.
- Se ha considerado los siguientes datos de interés para realizar el balance de materia:
 1. Producción de azúcar equivalente a 10000.00 quintales.
 2. Día de trabajo equivalente a 24 horas (debido a que la producción de BE se realiza solamente durante periodo de zafra y sus operaciones son constantes).
 3. Caña molida es de 4149.90 toneladas.
- Densidad de etanol a 20°C es 0.78 g/cm³ (ATPP, 2008; TABACAL Agroindustria, 2012)
- La melaza presenta un 45% de azúcares fermentables (TABACAL Agroindustria, 2012); (Zepeda, 2012); (Bioetanol, 2008) y (BID-CEL, 2007).

- Relaciones a utilizar de acuerdo a la producción de etanol:

$$\frac{0.27-0.3 \text{ Ton melaza}}{\text{Ton azúcar}}$$

(Berrios y Castro, 1998)

$$\frac{0.4503 \text{ Ton vapor}}{\text{Ton etanol}}$$

(Tecnologías Limpias Colombia, 2014)

$$\frac{6-12 \text{ lts etanol}}{\text{Ton azúcar}}$$

(Serrano, 1983)

$$\frac{2.7062 \text{ Ton agua}}{\text{Ton melaza esterilizada}}$$

(Tecnologías Limpias Colombia , 2014)

$$\frac{3.84 \text{ g levadura}}{\text{lts etanol}}$$

(Erazo, Cuellar y Vaquerano, 1994)

$$\frac{0.006 \text{ Ton alcohol impotable}}{\text{Ton etanol}}$$

(Tecnología limpias Colombia, 2014)

$$\frac{0.00125 \text{ Ton aceite fassel}}{\text{Ton etanol}}$$

(Tecnologías limpias Colombia, 2014)

- Proceso de producción es de tipo semicontínuo aeróbico.
- Reacción de fermentación alcohólica, la cual es una biorreacción que permite degradar azúcares en alcohol y dióxido de carbono:



- De la reacción de fermentación por estequiometria el 48.9% del azúcar se convierte en CO₂ (TABACAL Agroindustria, 2012; Bioetanol, 2008).

- De la reacción de fermentación el 51.1% del azúcar se convierte en alcohol (TABACAL Agroindustria, 2012); (Bioetanol, 2008).
- La secuencia de operaciones son desarrolladas como lo muestra el diagrama de proceso que se ilustra en la Figura 4.2

BASE DE CÁLCULO: 10000 quintales de azúcar en 1 día de trabajo.

- BALANCE DE MASA PARA LA FÁBRICA DE AZÚCAR.



Se considera que la producción de azúcar en un día laboral es de 10000 quintales.

- Cantidad de azúcar producida

$$\text{Azúcar} = 10000 \text{ qq} \times \frac{100 \text{ kg}}{1 \text{ qq}} \times \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ kg}}$$

Azúcar = 1000.00 Ton

- Cantidad de melaza producida

Del dato bibliográfico de la investigación de Berrios y Castro, 1998 se obtiene que por cada tonelada de azúcar se obtiene 0.27-0.30 toneladas de melaza, para fines de cálculo se optará por el máximo valor.

$$\text{Melaza} = 1000 \text{ Ton azúcar} \times \frac{0.3 \text{ Ton melaza}}{\text{Ton azúcar}}$$

Melaza = 300.00 Ton

Estableciendo balance de materia:

Masa que entra = Masa que sale

Jugo de caña = Azúcar + Melaza

Jugo de caña = 1000 Ton + 300 Ton

Jugo de caña = 1300.00 Ton

En la Tabla A3.1 se muestran las corrientes de entradas y salidas del proceso productivo del azúcar.

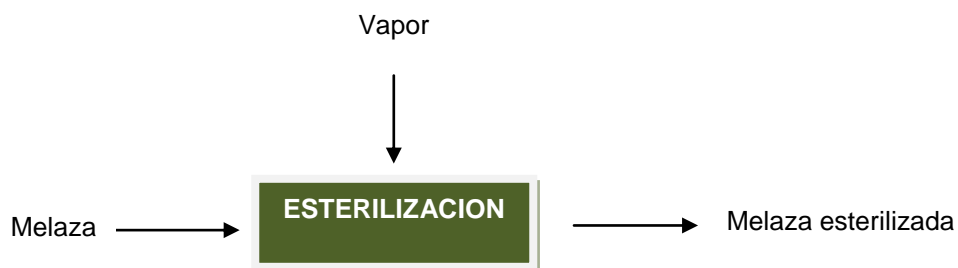
Tabla A3-1 Balance de masa correspondiente al proceso productivo del azúcar

Concepto	Entradas (Ton)	Salidas (Ton)
Jugo de caña	1300.00	
Azúcar		1000.00
Melaza		300.00
TOTAL	1300.00	1300.00

Fuente: Elaboración propia

- **BALANCE DE MASA EN LA ETAPA DE ESTERILIZACIÓN**

Esta es la primera etapa que contempla el proceso de producción del etanol luego de haber obtenido la melaza como subproducto de la producción de azúcar.



Balance de materia:

Masa que entra = Masa que sale

Melaza + Agua (Vapor) = Melaza esterilizada

- Cantidad de vapor de agua a utilizar

La relación que existe entre el vapor necesario para la esterilización de la melaza corresponde que por cada tonelada de etanol se requiere 0.4503 toneladas de vapor (Tecnologías Limpias Colombia, 2014); por lo tanto, se debe determinar primero la cantidad de etanol a obtener en el proceso productivo. Para poder encontrar la cantidad a obtener de etanol se hará uso de una relación que por cada tonelada de cañas molidas se obtienen de 6 a 12 litros de etanol (Serrano, 1983), para fines de cálculo se utilizará la mayor cantidad posible de obtener respecto a etanol.

La caña molida corresponde a 4149.90 toneladas.

$$\text{Etanol} = 4149.90 \text{ TC} \times \frac{12 \text{ lts de etanol}}{\text{TC}}$$

Etanol = 49798.80 lts

Para encontrar la masa de etanol que se obtiene se utiliza la densidad del etanol a 20°C equivalente a 0.78 g/cm³ (ATPP, 2008 y TABACAL Agroindustria, 2012).

$$\text{Etanol} = 49798.80 \text{ lts} \times \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ lts}}$$

Etanol = 49798800.00 cm³

$$\text{Etanol} = 49798800 \text{ cm}^3 \times \frac{0.78 \text{ g}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Etanol} = 38843064 \text{ g} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ kg}}$$

Etanol = 38.84 Ton

Por lo tanto, el vapor necesario corresponde:

$$\text{Agua (Vapor)} = \frac{0.4503 \text{ Ton vapor}}{\text{Ton etanol}} \times 38.84 \text{ Ton}$$

Agua (Vapor) = 17.49 Ton

Sustituyendo datos se tiene:

Melaza + Agua (Vapor) = Melaza esterilizada

300 Ton + 17.49 Ton = Melaza esterilizada

Melaza esterilizada = 317.49 Ton

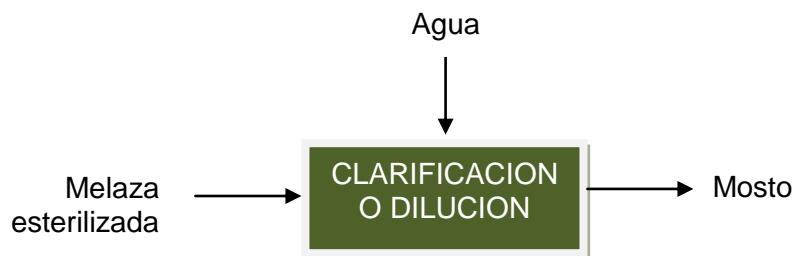
En la Tabla A3-2 se presentan las corrientes de entradas y salidas de la etapa de esterilización para producción de etanol.

Tabla A3-2 Balance de masa correspondiente a la etapa de esterilización en la producción de etanol

Concepto	Entradas (Ton)	Salidas (Ton)
Melaza	300.00	
Agua (Vapor)	17.49	
Melaza esterilizada		317.49
TOTAL	317.49	317.49

Fuente: Elaboración propia

- BALANCE DE MASA EN LA ETAPA DE CLARIFICACION O DILUCION



Balance de materia:

Masa que entra = Masa que sale

Melaza esterilizada + Agua = Mosto

- Cantidad de agua de dilución

El dato de bibliografía nos presenta que existe una relación de 2.7062 toneladas de agua por cada tonelada de melaza esterilizada. (Tecnologías Limpias Colombia, 2014)

$$\text{Agua} = 317.49 \text{ Ton melaza esterilizada} \times \frac{2.7062 \text{ Ton agua}}{\text{Ton melaza esterilizada}}$$

Agua = 859.19 Ton

Sustituyendo datos:

Melaza esterilizada + Agua = Mosto

317.49 Ton + 859.19 Ton = Mosto

Mosto = 1176.68 Ton

La cantidad de mosto a fermentar para producir 38.84 toneladas de etanol es 1176.68 toneladas.

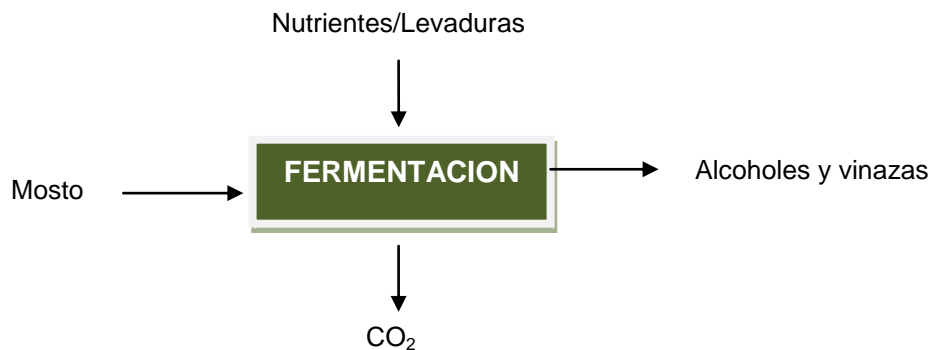
En la Tabla A3.3 se presentan las corrientes de entradas y salidas de la etapa de clarificación o dilución para producción de etanol.

Tabla A3-3 Balance de masa correspondiente a la etapa de clarificación o dilución en la producción de etanol

Concepto	Entradas (Ton)	Salidas (Ton)
Melaza esterilizada	317.49	
Agua	859.19	
Mosto		1176.68
TOTAL	1176.68	1176.68

Fuente: Elaboración propia

- BALANCE DE MASA EN LA ETAPA DE FERMENTACIÓN



Balance de materia:

Masa que entra = Masa que sale

Mosto + Nutrientes/Levadura = Vino + CO₂

- Dióxido de carbono producido

Para el cálculo de CO₂ se conoce que de las 300 toneladas de melazas que entran a proceso presentan una composición química promedio de un 45% de azúcares fermentables (TABACAL Agroindustria, 2012; Zepeda, 2012; Bioetanol, 2008 y BID-CEL, 2007), por lo tanto:

Azúcares fermentables = 300 Ton × 0.45

Azúcares fermentables = 135.00 Ton

De la reacción de fermentación por estequiometría el 48.9% del azúcar se convierte en CO₂ (TABACAL Agroindustria, 2012; Bioetanol, 2008), entonces:

CO₂ emitido = 135 Ton × 0.489

CO₂ emitido = 66.01 Ton

- Nutrientes y levaduras empleadas.

La cantidad de nutrientes/levaduras a adicionar al mosto para fermentar es por cada litro de etanol, se agregan 3.84 gramos de nutrientes/levaduras (Erazo, Cuellar y Vaquerano, 1994).

$$\text{Nutrientes/levaduras} = 49798.80 \text{ lts etanol} \times \frac{3.84 \text{ g nutrientes/levaduras}}{\text{lts etanol}}$$

$$\text{Nutrientes/levaduras} = 191227.39 \text{ g} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ kg}}$$

Nutrientes/levaduras = 0.19 Ton

Sustituyendo datos:

$$\text{Mosto} + \text{Nutrientes/Levadura} = \text{Vino} + \text{CO}_2$$

$$1176.68 \text{ Ton} + 0.19 \text{ Ton} = \text{Vino} + 66.01 \text{ Ton}$$

$$1176.87 \text{ Ton} = \text{Vino} + 66.01 \text{ Ton}$$

$$\text{Vino} = 1176.87 \text{ Ton} - 66.01 \text{ Ton}$$

Vino = 1110.86 Ton

En la Tabla A3-4 se muestran las corrientes de entradas y salidas de la etapa de fermentación para producción de etanol.

Tabla A3-4 Balance de masa correspondiente a la etapa de fermentación en la producción de etanol

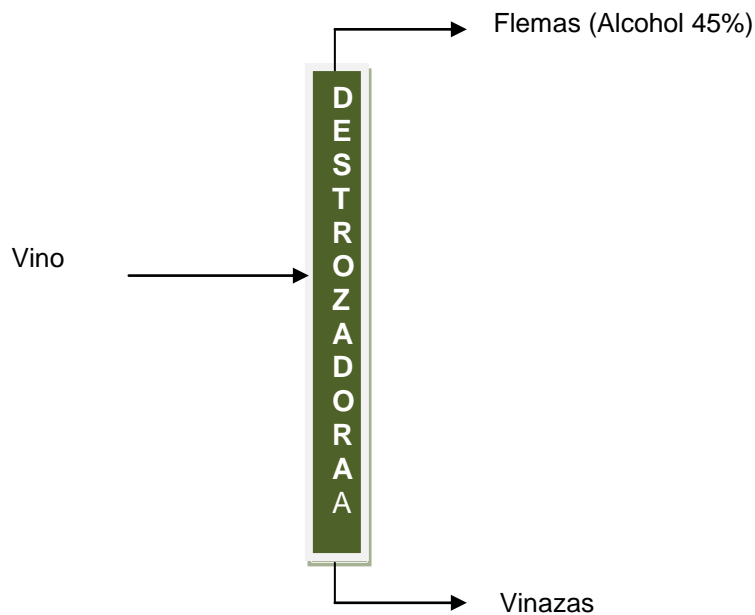
Concepto	Entradas (Ton)	Salidas (Ton)
Mosto	1176.68	
Nutrientes/levaduras	0.19	
Vino		1110.86
Dióxido de carbono (CO ₂)		66.01
TOTAL	1176.87	1176.87

Fuente: Elaboración propia

- BALANCE DE MASA PARA LA ETAPA DE DESTILACIÓN.

Esta etapa está comprendida por 3 columnas destiladoras (columna destrozadora, concentradora e hidroselectora), para las cuales se presentan sus respectivos balances de materia.

1. Columna Destrozadora



Balance de materia:

Masa que entra = Masa que sale

Vino = Flemas + Vinazas

Es importante recordar que las flemas son una corriente con un contenido alcohólico del 45%.

De la reacción de fermentación el 51.1% del azúcar se convierte en alcohol (TABACAL Agroindustria, 2012; Bioetanol, 2008), entonces:

Etanol = 135 Ton azucares fermentables \times 0.511

Etanol = 68.98 Ton

La corriente de flemas que abandona la columna destrozadora presenta 45% de concentración alcohólica, por lo tanto:

$$\text{Flemas} = \frac{68.98 \text{ Ton etanol}}{0.45}$$

Flemas = 153.29 Ton

Sustituyendo datos:

Vino = Flemas + Vinazas

1110.86 Ton = Vinazas + 153.29 Ton

Vinazas = 1110.86 Ton – 153.29 Ton

Vinazas = 957.57 Ton

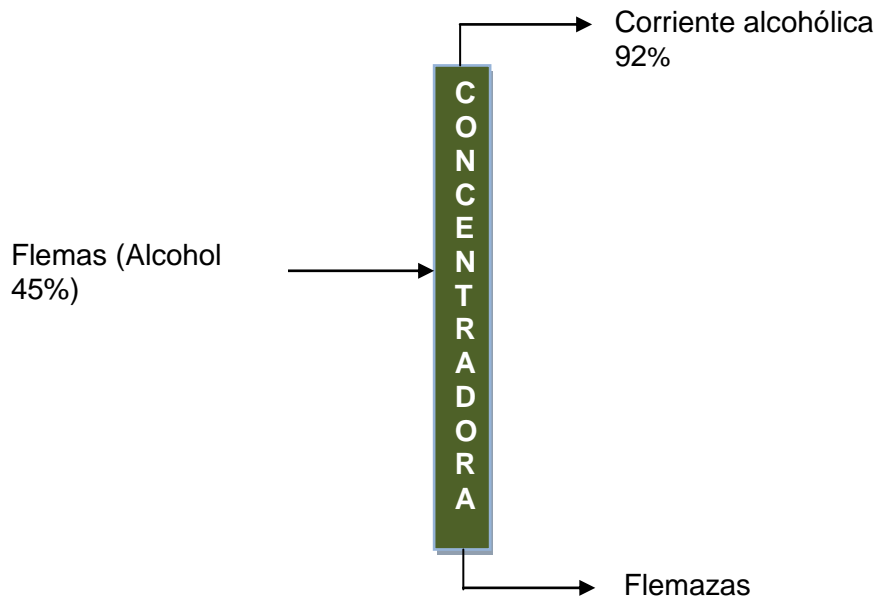
En la Tabla A3.5 se muestran las corrientes de entradas y salidas de la etapa destilación para la columna destrozadora en la producción de etanol.

Tabla A3-5 Balance de masa correspondiente a la etapa destilación (columna destrozadora) en la producción de etanol

Concepto	Entradas (Ton)	Salidas (Ton)
Vino	1110.86	
Flemas		153.29
Vinazas		957.57
TOTAL	1110.86	1110.86

Fuente: Elaboración propia

2. Columna Concentradora.



Balance de materia:

Masa que entra = Masa que sale

Flemas = Corriente alcohólica + Flemazas

En esta etapa la corriente alcohólica presenta una concentración del 92% de etanol. Como el alcohol puro que viene de la etapa anterior corresponde a un total de 68.98 toneladas, se tiene:

$$\text{Corriente alcohólica} = \frac{68.98 \text{ Ton}}{0.92}$$

Corriente alcohólica = 74.98 Ton

Sustituyendo datos:

Flemas = Corriente alcohólica + Flemazas

153.29 Ton = 74.98 Ton + Flemazas

Flemazas = 153.29 Ton – 74.98 Ton

Flemazas = 78.31 Ton

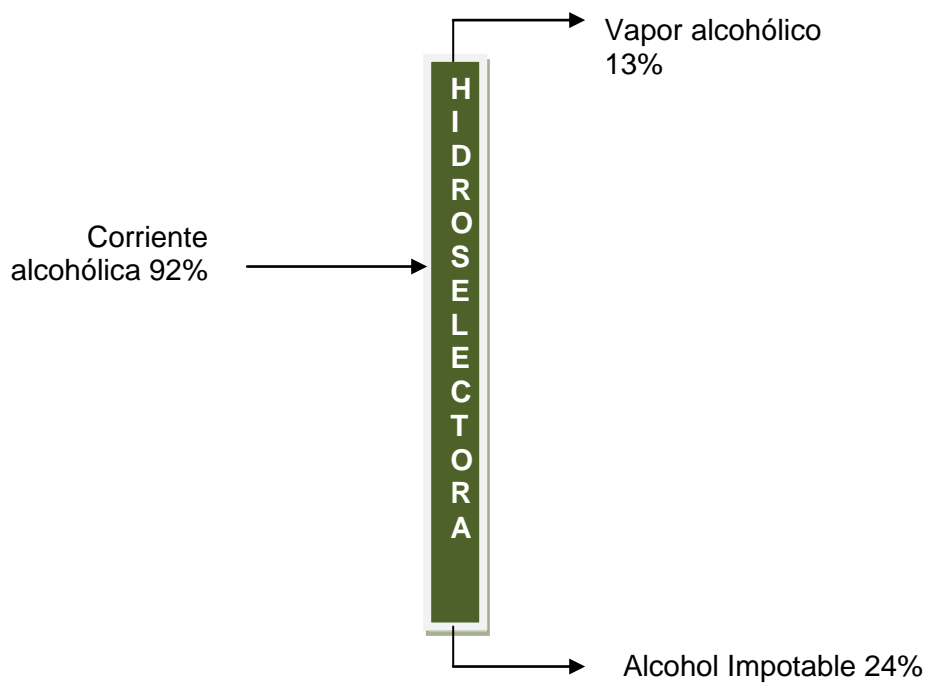
En la Tabla A3-6 se presentan las corrientes de entradas y salidas de la etapa destilación para la columna concentradora en la producción de etanol.

Tabla A3-6 Balance de masa correspondiente a la etapa destilación (columna concentradora) en la producción de etanol

Concepto	Entradas (Ton)	Salidas (Ton)
Flemas	153.29	
Corriente alcohólica		74.98
Flemazas		78.31
TOTAL	153.29	153.29

Fuente: Elaboración propia

3. Columna Hidroselectora.



Balance de materia:

Masa que entra = Masa que sale

Corriente alcohólica + Agua = Vapor alcohólico + Alcohol impotable

- Alcohol impotable producido

De la relación existente entre etanol y alcohol impotable se obtiene que por cada tonelada de etanol se producen 0.006 toneladas de alcohol impotable (Tecnologías limpias Colombia, 2014), por lo tanto:

$$\text{Alcohol impotable} = 38.84 \text{ Ton} \times \frac{0.006 \text{ Ton alcohol impotable}}{\text{Ton etanol}}$$

Alcohol impotable = 0.23 Ton

- Vapor alcohólico producido

El vapor alcohólico posee una concentración del 13% respecto al alcohol puro, por lo tanto:

$$\text{Vapor alcohólico} = \frac{68.98 \text{ Ton}}{0.13}$$

Vapor alcohólico = 530.61 Ton

Sustituyendo datos:

Corriente alcohólica + Agua = Vapor alcohólico + Alcohol impotable

74.98 Ton + Agua = 530.61 Ton + 0.23 Ton

74.98 Ton + Agua = 530.84 Ton

Agua = 530.84 Ton – 74.98 Ton

Agua = 455.86 Ton

En la Tabla A3.7 se presentan las corrientes de entradas y salidas de la etapa destilación para la columna hidroselctora en la producción de etanol.

Tabla A3-7 Balance de masa correspondiente a la etapa destilación (columna hidroselctora) en la producción de etanol

Concepto	Entradas (Ton)	Salidas (Ton)
Corriente alcohólica	74.98	
Agua	455.86	
Vapor alcohólico		530.61
Alcohol imponible		0.23
TOTAL	530.84	530.84

Fuente: Elaboración propia

- BALANCE DE MASA PARA LA ETAPA DE RECTIFICACION.



Balance de materia:

Masa que entra = Masa que sale

Vapor alcohólico = Etanol + Flemazas + Aceites fassel

- Aceite de fassel producido

De la relación de producción de aceites fassel con la producción de alcohol rectificado al 96%, por una tonelada de este último se producen 0.00125 toneladas de aceite fassel (Tecnologías limpias Colombia, 2014).

$$\text{Aceite fassel} = 38.84 \text{ Ton etanol} \times \frac{0.00125 \text{ Ton aceites fassel}}{\text{Ton etanol}}$$

Aceite fassel = 0.05Ton

Sustituyendo en la ecuación:

Vapor alcohólico = Etanol + Flemazas + Aceites fassel

530.61 Ton = 38.84 Ton + Flemazas + 0.05 Ton

530.61 Ton = 38.89 Ton + Flemazas

Flemazas = 530.61 Ton – 38.89 Ton

Flemazas = 491.72 Ton

En la Tabla A3-8 se presentan las corrientes de entradas y salidas de la etapa de rectificación en la producción de etanol.

Tabla A3-8 Balance de masa correspondiente a la etapa de rectificación en la producción de etanol

Concepto	Entradas (Ton)	Salidas (Ton)
Vapor alcohólico	530.61	
Etanol		38.84
Flemazas		491.72
Aceites fassel		0.05
TOTAL	530.61	530.61

Fuente: Elaboración propia

El balance de masa global que se atribuye al proceso productivo de BE se detalla en la Tabla 4-10.

ANEXO 4

Consumo de energía en la producción de BD en El Salvador

Horas para producir un lote de biodiesel	12
Días de trabajo	5
Horas de producción anual	3600
Tipo de energía	Eléctrica

Tabla A4-1 Consumo de energía en la producción de BD sin TEA

Etapa	Tiempo requerido para un lote(min)	Tiempo requerido anualmente (min)	Horas de funcionamiento al año	Capacidad de equipo (kW)	Energía consumida KWh/año
Descascarillador y prensado	33.3	9990	166.5	5.5	915.75
Calentamiento y desgomado	15	4500	75	60	4500
Separador de gomas (centrifuga 400 rpm)	25	7500	125	29.83	3728.75
Neutralización	30	9000	150		0
Secador	23	6900	115	60	6900
Filtración 1		0	0		0
Reactor (Agitación)	30	9000	150	0.14	21
Evaporación (Ventilador)	40	12000	200	75	15000
Lavado YFiltrado 2	25	7500	125		0
Bomba PA	35	10500	175	0.375	65.625
Bomba PB	35	10500	175	0.375	65.625
Bomba P4 (75psi)	35	10500	175	0.375	65.625
Bomba P6	35	10500	175	0.375	65.625
Bomba P7	35	10500	175	0.375	65.625
Bomba P8	35	10500	175	0.375	65.625
Bomba P9	35	10500	175	0.375	65.625
Bomba P10	35	10500	175	0.375	65.625
Bomba P11	35	10500	175	0.375	65.625
Bomba P12	35	10500	175	0.375	65.625
Bomba P14	35	10500	175	0.375	65.625
Bomba P15	35	10500	175	0.375	65.625
Bomba P16	35	10500	175	0.375	65.625

Etapas	Tiempo requerido para un lote(min)	Tiempo requerido anualmente (min)	Horas de funcionamiento al año	Capacidad de equipo (kW)	Energía consumida KWh/año
PLC	643	192900	3215		327.4
Total de energía consumida sin TEA					32246.025

Fuente: Elaboración propia

Tabla A4-2 Consumo de energía en la producción de BD con TEA

Energía consumida con TEA	37620.3625
---------------------------	------------

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 5

Consumo de energía en la producción de BE en El Salvador

Horas de trabajo por día	24
Días de trabajo	180
Horas de producción anual	4320
Tipo de energía	Eléctrica

Tabla A5-1 Consumo de energía en la producción de BE

Etapa	Tiempo requerido por zafra (h)	Tiempo requerido anualmente (min)	Horas de funcionamiento al año	Capacidad de equipo (kW)	Energía consumida kWh/año
Banda transportadora P1	4320	259200	4320	40	12493.44
Molino	4320	259200	4320	60	18740.16
Bomba P2	4320	259200	4320	8	2498.688
Banda transportadora P3	4320	259200	4320	40	12493.44
Bomba P4	4320	259200	4320	40	12493.44
Intercambiador de calor	4320	259200	4320	40	12493.44
Bomba P7	4320	259200	4320	40	12493.44
Bomba P8	4320	259200	4320	8	2498.688
Bomba P9	4320	259200	4320	10	3123.36
Banda transportadora P10	4320	259200	4320	15	4685.04
Clarificador	4320	259200	4320	75	23425.2
Filtro prensa	4320	259200	4320	25	7808.4
Bomba P13	4320	259200	4320	8	2498.688
Banda transportadora P12	4320	259200	4320	15	4685.04
Bomba P11	4320	259200	4320	60	18740.16
Bomba P14	4320	259200	4320	40	12493.44
Bomba P16	4320	259200	4320	15	4685.04
Centrifugadora A	4320	259200	4320	40	12493.44
Banda transportadora P17	4320	259200	4320	40	12493.44
Secador	4320	259200	4320	35	10931.76
Tornillo sinfín P18	4320	259200	4320	15	4685.04
Bomba P19	4320	259200	4320	15	4685.04
Tacho A	4320	259200	4320	80	24986.88

Etapa	Tiempo requerido por zafra (h)	Tiempo requerido anualmente (min)	Horas de funcionamiento al año	Capacidad de equipo (kW)	Energía consumida kWh/año
Bomba P20	4320	259200	4320	15	4685.04
Bomba P21	4320	259200	4320	15	4685.04
Tacho B	4320	259200	4320	80	24986.88
Bomba P15	4320	259200	4320	15	4685.04
Bomba P22	4320	259200	4320	15	4685.04
Centrifugadora B	4320	259200	4320	40	12493.44
Tacho C	4320	259200	4320	80	24986.88
Bomba P23	4320	259200	4320	15	4685.04
Cristalizador en frío	4320	259200	4320	40	12493.44
Bomba P24	4320	259200	4320	15	4685.04
Centrifugadora C	4320	259200	4320	40	12493.44
Bomba P25	4320	259200	4320	15	4685.04
Esterilizador	4320	259200	4320	40	12493.44
Bomba P27	4320	259200	4320	4	1249.344
Bomba P28	4320	259200	4320	15	4685.04
Bomba P29	4320	259200	4320	20	6246.72
Agitador de dilución	4320	259200	4320	15	4685.04
Bomba P30	4320	259200	4320	40	12493.44
Bomba P31	4320	259200	4320	15	4685.04
Fermentador	4320	259200	4320	100	31233.6
Bomba P33	4320	259200	4320	40	12493.44
Bomba P34	4320	259200	4320	15	4685.04
Bomba P35	4320	259200	4320	15	4685.04
Bomba P36	4320	259200	4320	15	4685.04
Bomba P37	4320	259200	4320	15	4685.04
Bomba P38	4320	259200	4320	15	4685.04
Bomba P39	4320	259200	4320	15	4685.04
Bomba P40	4320	259200	4320	15	64800
Bomba P41	4320	259200	4320	15	64800
Bomba P42	4320	259200	4320	15	64800
Torre Destrozadora	4320	259200	4320	100	432000
Torre Concentradora	4320	259200	4320	100	432000
Torre Hidroselectora	4320	259200	4320	100	432000
Torre Rectificadora	4320	259200	4320	100	432000
Total de energía consumida					2399,649.41

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 6

Herramienta de cálculo

INDICES DE PRODUCTIVIDAD

Tabla A6-1 Índices de productividad para el cálculo de HE

ÍNDICE DE PRODUCTIVIDAD			
Índices de Productividad para la Producción de Biodiesel y Bioetanol			
Material/Insumo	Cantidad de producción (ton)	Área destinada a la producción (Ha)	Índice de productividad (ton/ha)
Higuerillo	1.2	1	1.20
Maní	2.267964547	0.69881202	3.25
Tempate			5.00
Caña de azúcar	6183038	64496.85535	95.87
Índices de Productividad para la Producción de Biodiesel y Bioetanol			
Material/Insumo	Cantidad de producción (m3)	Área destinada a la producción (Ha)	Índice de productividad (m3/ha)
Agua	4.1201E+12	2043699.66	2016000

Fuente: Elaboración propia

EVALUACIÓN DE HUELLA ECOLÓGICA POR CONSUMOS

Figura A6-2 Hoja de cálculo de HE de consumos para BD sin TEA. PARTE 1

Origen	Insumos	Cantidades Entrantes	Unidades	Índice de Productividad (TON/Hec)	Índice de Productividad (m3/Hec)	Intensidad Energética (GJ/ton)	Factor de emisión (tCO2/Gj)
Higuerillo	Semilla de Higuerillo	1,000.00	Ton	1.20			
	Hidróxido de Sodio	10.9	Ton			40.00	0.0737
	Metanol	85.2	Ton			40.00	0.0737
	Ácido Fosfórico	0.7	Ton			40.00	0.0737
	Agua consumida	103.9	m ³		2016000.00		
	Silicato de Magnesio	31.50	Ton			40.00	0.0737
Maní	Semilla de maní	2,721.60	Ton	3.25			
	Hidróxido de Sodio	10.90	Ton			40.00	0.0737
	Metanol	86.76	Ton			40.00	0.0737
	Ácido Fosfórico	0.69	Ton			40.00	0.0737
	Agua consumida	103.96	m ³		2016000.00		
	Silicato de Magnesio	31.32	Ton			40.00	0.0737
Tempate	Semilla de tempate	1,573.77	Ton	5.00			
	Hidróxido de Sodio	10.87	Ton			40.00	0.0737
	Metanol	85.36	Ton			40.00	0.0737
	Ácido Fosfórico	0.69	Ton			40.00	0.0737
	Agua consumida	103.88	m ³		2016000.00		
	Silicato de Magnesio	31.36	Ton			40.00	0.0737

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-3 Hoja de cálculo de HE de consumos para BD sin TEA. PARTE 2

Origen	Insumos	Seleccionar Tipo de Área Productiva	Tipo de Área													
			Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua Marina y Continental		Superficie construida		Tierra urbanizada		Bosques para CO2	
			Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	tCO2	H.E
Higuerillo	Semilla de Higuerillo	Tierras de Cultivo	833.33	2,091.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Hidróxido de Sodio	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.02	8.73
	Metanol	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	251.11	68.42
	Ácido Fosfórico	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.05	0.56
	Agua consumida	Agua marina y Continental	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Silicato de Magnesio	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	92.87	25.30
Maní	Semilla de maní	Tierras de Cultivo	838.59	2,104.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Hidróxido de Sodio	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.14	8.76
	Metanol	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	255.78	69.70
	Ácido Fosfórico	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.05	0.56
	Agua consumida	Agua marina y Continental	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Silicato de Magnesio	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	92.33	25.16
Tempate	Semilla de tempate	Tierras de Cultivo	314.75	790.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Origen	Insumos	Seleccionar Tipo de Área Productiva	Tipo de Área														
			Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua Marina y Continental		Superficie construida		Tierra urbanizada		Bosques para CO2		
			Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	tCO2	H.E	
	Hidróxido de Sodio	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.04	8.73
	Metanol	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	251.65	68.57
	Ácido Fosfórico	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.05	0.56
	Agua consumida	Agua marina y Continental	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Silicato de Magnesio	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	92.45	25.19
		Huella ecológica por tipo de tierra	Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua marina y Continental		Superficie Construida		Tierra Urbanizada		Bosques para CO2		
		Higuerillo	2091.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	103.01		
		Maní	2104.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	104.17		
		Tempate	790.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	103.05		

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-4 Hoja de cálculo de HE de consumos para BD sin TEA. PARTE 3

Origen	Insumos	Área productiva (Ha)	tCO2	Huella Ecológica global por Tipo de insumo (Hag)
Higuerillo	Semilla de Higuerillo	833.33	0.00	2091.67
	Hidróxido de Sodio	0.00	32.02	8.73
	Metanol	0.00	251.11	68.42
	Ácido Fosfórico	0.00	2.05	0.56
	Agua consumida	0.00	0.00	0.00
	Silicato de Magnesio	0.00	92.87	25.30
Maní	Semilla de maní	838.59	0.00	2104.85
	Hidróxido de Sodio	0.00	32.14	8.76
	Metanol	0.00	255.78	69.70
	Ácido Fosfórico	0.00	2.05	0.56
	Agua consumida	0.00	0.00	0.00
	Silicato de Magnesio	0.00	92.33	25.16
Tempate	Semilla de tempate	314.75	0.00	790.03
	Hidróxido de Sodio	0.00	32.04	8.73
	Metanol	0.00	251.65	68.57
	Ácido Fosfórico	0.00	2.05	0.56
	Agua consumida	0.00	0.00	0.00
	Silicato de Magnesio	0.00	92.45	25.19
		Área Productiva Total Producción Biodiesel (Ha)	tCO2	H.E. Total de insumos Biodiesel (Hag)
	Higuerillo	833.33	378.04	2,194.68
	Maní	838.59	382.30	2,209.02
	Tempate	314.75	378.18	893.08

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-5 Hoja de cálculo de HE de consumos para BD con TEA. PARTE 1

Origen	Insumos	Cantidades Entrantes	Unidades	Índice de Productividad (TON/Hec)	Índice de Productividad (m3/Hec)	Intensidad Energética (GJ/ton)	Factor de emisión (tCO2/Gj)
Higuerillo	Semilla de Higuerillo	1,000.00	Ton	1.2			
	Hidróxido de Sodio	17.7	Ton			40.0	0.0737
	Metanol	87.1	Ton			40.0	0.0737
	Ácido Fosfórico	0.7	Ton			40.0	0.0737
	Agua consumida	11.2	Ton			40.0	0.0737
	Silicato de Magnesio	104.1	m ³		2016000.0		
	Semilla de maní	30.86	Ton			40.0	0.0737
Maní	Hidróxido de Sodio	2,721.60	Ton	3.2			
	Metanol	17.68	Ton			40.0	0.0737
	Ácido Fosfórico	88.72	Ton			40.0	0.0737
	Agua consumida	0.69	Ton			40.0	0.0737
	Silicato de Magnesio	11.21	Ton			40.0	0.0737
	Semilla de tempate	104.19	m ³		2016000.0		
	Hidróxido de Sodio	30.68	Ton			40.0	0.0737
Tempate	Metanol	1,573.77	Ton	5.0			
	Ácido Fosfórico	17.68	Ton			40.0	0.0737
	Agua consumida	87.28	Ton			40.0	0.0737
	Silicato de Magnesio	0.69	Ton			40.0	0.0737
	Semilla de Higuerillo	11.21	Ton			40.0	0.0737
	Hidróxido de Sodio	104.11	m ³		2016000.0		
	Metanol	30.72	Ton			40.0	0.0737

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-6Hoja de cálculo de HE de consumos para BD con TEA. PARTE 2

Origen	Insumos	Seleccionar Tipo de Área Productiva	Tipo de Área													
			Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua Marina y Continental		Superficie construida		Tierra urbanizada		Bosques para CO2	
			Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	tCO2	H.E
Higuerillo	Semilla de Higuerillo	Tierras de Cultivo	833.33	2091.67	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00
	Hidróxido de Sodio	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	52.12	14.20
	Metanol	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	256.70	69.94
	Ácido Fosfórico	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	2.05	0.56
	Agua consumida	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	33.06	9.01
	Silicato de Magnesio	Agua marina y Continental	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00
	Semilla de maní	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	90.97	24.79
Maní	Hidróxido de Sodio	Tierras de Cultivo	838.59	2104.85	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00
	Metanol	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	52.12	14.20
	Ácido Fosfórico	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	261.53	71.26
	Agua consumida	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	2.05	0.56
	Silicato de Magnesio	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	33.06	9.01
	Semilla de tempate	Agua marina y Continental	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00
	Hidróxido de Sodio	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	90.44	24.64
Tempate	Metanol	Tierras de Cultivo	314.75	790.03	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00
	Ácido Fosfórico	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	52.12	14.20
	Agua consumida	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	257.31	70.11
	Silicato de Magnesio	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	2.05	0.56
	Semilla de Higuerillo	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	33.06	9.01
	Hidróxido de Sodio	Agua marina y Continental	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00
	Metanol	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	90.56	24.68
		Huella ecológica por tipo de tierra	Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua marina y Continental		Superficie Construida		Tierra Urbanizada		Bosques para CO2	

Origen	Insumos	Seleccionar Tipo de Área Productiva	Tipo de Área													
			Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua Marina y Continental		Superficie construida		Tierra urbanizada		Bosques para CO2	
			Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	tCO2	H.E
		Higuerillo	2091.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	118.50		
		Maní	2104.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	119.67		
		Tempate	790.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	118.56		

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-7 Hoja de cálculo de HE de consumos para BD con TEA. PARTE 3

Origen	Insumos	Área productiva (Ha)	tCO2	HE global por Tipo de insumo (Hag)
Higuerillo	Semilla de Higuerillo	833.33	0.00	2091.67
	Hidróxido de Sodio	0.00	52.12	14.20
	Metanol	0.00	256.70	69.94
	Ácido Fosfórico	0.00	2.05	0.56
	Ácido Sulfúrico	0.00	33.06	9.01
	Agua consumida	0.00	0.00	0.00
	Silicato de Magnesio	0.00	90.97	24.79
Maní	Semilla de maní	838.59	0.00	2104.85
	Hidróxido de Sodio	0.00	52.12	14.20
	Metanol	0.00	261.53	71.26
	Ácido Fosfórico	0.00	2.05	0.56
	Ácido Sulfúrico	0.00	33.06	9.01
	Agua consumida	0.00	0.00	0.00
	Silicato de Magnesio	0.00	90.44	24.64
Tempate	Semilla de tempate	314.75	0.00	790.03
	Hidróxido de Sodio	0.00	52.12	14.20
	Metanol	0.00	257.31	70.11
	Ácido Fosfórico	0.00	2.05	0.56
	Ácido Sulfúrico	0.00	33.06	9.01

Origen	Insumos	Área productiva (Ha)	tCO2	HE global por Tipo de insumo (Hag)
	Agua consumida	0.00	0.00	0.00
	Silicato de Magnesio	0.00	90.56	24.68
		Área Productiva Total Producción BD(Ha)	tCO2	H.E. Total de insumos BD(Hag)
Higuerillo		833.33	434.89	2,210.17
Maní		838.59	439.20	2,224.53
Tempate		314.75	435.10	908.59

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-8 Hoja de cálculo de HE de consumos para BE. PARTE 1

Materias Primas e Insumos		Cantidades Entrantes	Unidades	Índice de Productividad	Índice de Productividad (m3/Hec)	Intensidad Energética (GJ/ton)	Factor de emisión (tCO2/Gj)
Etanol a partir de Melaza	Caña de azúcar	74,328.34	Ton	95.87			
	Nutrientes/levaduras	47.37	Ton			40.00	0.0737
	Agua	117,277.45	m ³		2016000		

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-9 Hoja de cálculo de HE de consumos para BE. PARTE 2

Materias Primas e Insumos		Área Productiva	Tipo de Área													
			Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua Marina y Continental		Superficie construida		Tierra urbanizada		Bosques para CO2	
			Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	tCO2	H.E
Etanol a partir de Melaza	Caña de azúcar	Tierras de Cultivo	775.34	1946.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Nutrientes/levaduras	Bosques de CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	139.65	38.05
	Agua	Agua marina y Continental	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques		Agua marina y Continental		Superficie Construida		Tierra Urbanizada		Bosques para CO2			
Área Productiva Total para:			1946.10	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.05	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-10 Hoja de cálculo de HE de consumos para BE. PARTE 3

Materias Primas e Insumos		Área productiva (Ha)	tCO2	Huella Ecológica global por Tipo de insumo (Hag)
Etanol a partir de Melaza	Caña de azúcar	775.34	0.00	1946.10
	Nutrientes/levaduras	0.00	139.65	38.05
	Agua	0.06	0.00	0.02
Área Productiva Total Producción Biodiesel (Ha)		775.40	tCO2	H.E. Total de insumos Biodiesel (Hag)
		775.40	139.65	1,984.17

HUELLA ECOLÓGICA DE ENERGÍA

Tabla A6-11 Hoja de cálculo de HE de energía para BD sin TEA. PARTE 1

Origen	Tipo de energía eléctrica	Consumos	Unidades	Consumo en Gj/año	Productividad energética m2/GWh	Intensidad energética (Gj/ha/año)	Factor de emisión (tCO2/Gj)
Higuerillo	Hidráulica	9,917.66	kWh/año	357.0		15000.000	
	Geotérmica	4,289.40	kWh/año	154.4	0.000163		
	Biomasa	2,192.96	kWh/año	26.3		0.031	0.112
	Térmica	15,846.01	kWh/año	570.5		0.027	0.097
Maní	Hidráulica	9,917.66	kWh/año	357.0		15000.000	
	Geotérmica	4,289.40	kWh/año	154.4	0.000163		
	Biomasa	2,192.96	kWh/año	26.3		0.031	0.112
	Térmica	15,846.01	kWh/año	570.5		0.027	0.097
Tempate	Hidráulica	9,917.66	kWh/año	357.0		15000.000	
	Geotérmica	4,289.40	kWh/año	154.4	0.000163		
	Biomasa	2,192.96	kWh/año	26.3		0.031	0.112
	Térmica	15,846.01	kWh/año	570.5		0.027	0.097

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-12 Hoja de cálculo de HE de energía para BD sin TEA. PARTE 2

Origen	Tipo de energía	Seleccionar Tipo de Área Productiva	Tipo de Área													
			Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua Marina y Continental		Superficie construida		Tierra Urbanizada		Bosques para CO2	
			Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	tCO2	H.E
Higuerillo	Hidráulica	Tierras de Pastoreo	0.00	0.000	0.024	0.011	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000
	Geotérmica	Tierras de Pastoreo	0.00	0.000	0.699	0.321	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000
	Biomasa	Bosques para CO2	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	2.947	0.803
	Térmica	Bosques para CO2	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	55.505	15.124
Maní	Hidráulica	Tierras de Pastoreo	0.00	0.000	0.024	0.011	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000
	Geotérmica	Tierras de Pastoreo	0.00	0.000	0.699	0.321	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000
	Biomasa	Bosques para CO2	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	2.947	0.803
	Térmica	Bosques para CO2	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	55.505	15.124
Tempate	Hidráulica	Tierras de Pastoreo	0.00	0.000	0.024	0.011	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000
	Geotérmica	Tierras de Pastoreo	0.00	0.000	0.699	0.321	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000
	Biomasa	Bosques para CO2	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	2.947	0.803
	Térmica	Bosques para CO2	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	55.505	15.124
		Huella ecológica por tipo de tierra	Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua marina y Continental		Superficie Construida		Tierra Urbanizada		Bosques para CO2	
		Higuerillo	0.000		0.332		0.000		0.000		0.000		0.000		15.927	
		Maní	0.000		0.332		0.000		0.000		0.000		0.000		15.927	
		Tempate	0.000		0.332		0.000		0.000		0.000		0.000		15.927	

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-13 Hoja de cálculo de HE de energía para BD sin TEA. PARTE 3

Origen	Tipo de energía	Área productiva (Ha)	tCO₂	Huella Ecológica global por Tipo de insumo (Hag)
Higuerillo	Hidráulica	0.024	0.00	0.011
	Geotérmica	0.699	0.00	0.321
	Biomasa	0.000	2.947	0.803
	Térmica	0.000	55.505	15.124
Maní	Hidráulica	0.024	0.00	0.011
	Geotérmica	0.699	0.00	0.321
	Biomasa	0.000	2.947	0.803
	Térmica	0.000	55.505	15.124
Tempate	Hidráulica	0.024	0.00	0.011
	Geotérmica	0.699	0.00	0.321
	Biomasa	0.000	2.947	0.803
	Térmica	0.000	55.505	15.124
		Área Productiva Total Producción Biodiesel (Ha)	tCO₂	H.E. Total de insumos Biodiesel (Hag)
	Higuerillo	0.72	58.45	16.26
	Maní	0.72	58.45	16.26
	Tempate	0.72	58.45	16.26

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-14 Hoja de cálculo de HE de energía para BD con TEA. PARTE 1

Origen	Tipo de energía eléctrica	Consumos	Unidades	Consumo en Gj/año	Productividad energética m2/GWh	Intensidad energética (Gj/ha/año)	Factor de emisión (tCO2/Gj)
Higuerillo	Hidráulica	11,570.60	kWh/año	416.5		15000.000	
	Geotérmica	5,004.30	kWh/año	180.2	0.000163		
	Biomasa	2,558.46	kWh/año	30.7			0.112
	Térmica	18,487.01	kWh/año	665.5			0.097
Maní	Hidráulica	11,570.60	kWh/año	416.5		15000.000	
	Geotérmica	5,004.30	kWh/año	180.2	0.000163		
	Biomasa	2,558.46	kWh/año	30.7			0.112
	Térmica	18,487.01	kWh/año	665.5			0.097
Tempate	Hidráulica	11,570.60	kWh/año	416.5		15000.000	
	Geotérmica	5,004.30	kWh/año	180.2	0.000163		
	Biomasa	2,558.46	kWh/año	30.7			0.112
	Térmica	18,487.01	kWh/año	665.5			0.097

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-15 Hoja de cálculo de HE de energía para BD con TEA. PARTE 2

Origen	Tipo de energía eléctrica	Seleccionar Tipo de Área Productiva	Tipo de Área													
			Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua Marina y Continental		Superficie construida		Tierra Urbanizada		Bosques para CO2	
			Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	tCO2	H.E
Higuerillo	Hidráulica	Tierras de Pastoreo	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Geotérmica	Tierras de Pastoreo	0.00	0.00	0.81	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Biomasa	Bosques para CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.44	0.94
	Térmica	Bosques para CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	64.76	17.64
Maní	Hidráulica	Tierras de Pastoreo	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Geotérmica	Tierras de Pastoreo	0.00	0.00	0.81	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Biomasa	Bosques para CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.44	0.94
	Térmica	Bosques para CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	64.76	17.64
Tempate	Hidráulica	Tierras de Pastoreo	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Geotérmica	Tierras de Pastoreo	0.00	0.00	0.81	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Biomasa	Bosques para CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.44	0.94
	Térmica	Bosques para CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	64.76	17.64

Huella ecológica por tipo de tierra	Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua marina y Continental	Superficie Construida	Tierra Urbanizada	Bosques para CO2
Higuerillo	0.000	0.388	0.000	0.000	0.000	0.000	18.582
Maní	0.000	0.388	0.000	0.000	0.000	0.000	18.582
Tempate	0.000	0.388	0.000	0.000	0.000	0.000	18.582

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-17 Hoja de cálculo de HE de energía para BD con TEA. PARTE 3

Origen	Tipo de energía eléctrica	Área productiva (Ha)	tCO₂	Huella Ecológica global por Tipo de insumo (Hag)
Higuerillo	Hidráulica	0.03	0.00	0.01
	Geotérmica	0.81	0.00	0.37
	Biomasa	0.00	3.44	0.94
	Térmica	0.00	64.76	17.64
Maní	Hidráulica	0.03	0.00	0.01
	Geotérmica	0.81	0.00	0.37
	Biomasa	0.00	3.44	0.94
	Térmica	0.00	64.76	17.64
Tempate	Hidráulica	0.03	0.00	0.01
	Geotérmica	0.81	0.00	0.37
	Biomasa	0.00	3.44	0.94
	Térmica	0.00	64.76	17.64

	Área Productiva Total Producción Biodiesel (Ha)	tCO2	H.E. Total de insumos Biodiesel (Hag)
Higuerillo	0.84	68.19	18.97
Mani	0.84	68.19	18.97
Tempate	0.84	68.19	18.97

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-18 Hoja de cálculo de HE de energía para BE. PARTE 1

Origen	Tipo de energía	Consumos	Unidades	Consumo en G/año	Productividad energética m ₂ /GWh	Intensidad energética (Gj/ha/año)	Factor de emisión (tCO ₂ /Gj)
Bioetanol	Hidráulica	738,041.3	kWh/año	26569.5		15000.000	
	Geotérmica	319,203.7	kWh/año	11491.3	0.000163		
	Biomasa	163,193.7	kWh/año	5875.0			0.112
	Térmica	1,179,210.8	kWh/año	42451.6			0.097

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-19 Hoja de cálculo de HE de energía para BE. PARTE 2

Origen	Tipo de energía eléctrica	Seleccionar Tipo de Área Productiva	Tipo de Área													
			Tierras de Cultivo		Tierras de Pastoreo		Bosques		Agua Marina y Continental		Superficie construida		Tierra Urbanizada		Bosques para CO2	
			Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	Área	H.E	tCO2	H.E
Bioetanol	Hidráulica	Tierras de Pastoreo	0.00	0.00	1.77	0.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Geotérmica	Tierras de Pastoreo	0.00	0.00	51.98	23.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Biomasa	Bosques para CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	658.00	179.29
	Térmica	Bosques para CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4,130.54	1,125.49
			Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua marina y Continental	Superficie Construida	Tierra Urbanizada	Bosques para CO2							
Huella ecológica por tipo de tierra			0.00	24.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1,304.78	

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-20 Hoja de cálculo de HE de energía para BE. PARTE 3

Origen	Tipo de energía	Área productiva (Ha)	tCO2	Huella Ecológica global por tipo de insumo (Hag)
Bioetanol	Hidráulica	1.77	0.00	0.81
	Geotérmica	51.98	0.00	23.91
	Biomasa	0.00	179.29	179.29
	Térmica	0.00	1,125.49	1,125.49

Área Productiva Total Producción Biodiesel (Ha)	tCO2	H.E. Total de insumos Biodiesel (Hag)
53.76	1,304.78	1,329.51

Fuente: Elaboración propia

HUELLA ECOLÓGICA DE RESIDUOS

Tabla A6-21 Hoja de cálculo de HE de residuos para BD sin TEA. PARTE 1

Origen	Residuos	Cantidades Generadas	Unidades	Tipo de Área						
				Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua Marina y Continental	Superficie construida	Tierra Urbanizada	Bosques de CO2
				HE	HE	HE	HE	HE	HE	H.E
Higuerillo	Cascarilla	880.60	Ton	0.000000	0.000287	0.217507	0.000000	0.280030	0	2.131044776
	Agua de proceso	103.94	Ton	0.000000	0.000002	0.000147	0.000000	0.002453	0	0.008284
	Gomas	16.33	Ton	0.000000	0.000428	0.000949	0.000000	0.002172	0	1.714829
	Fosfato trisodico	1.16	Ton	0.000000	0.000005	0.000783	0.000000	0.006015	0	0.062352
	Glicerina	83.28	Ton	0.000000	0.000373	0.016156	0.000000	0.006112	0	3.755771
	Hidróxido de sodio de proceso	7.84	Ton	0.000000	0.000030	0.014195	0.000000	0.038428	0	0.277624
	Silicato de magnesio de proceso	31.50	Ton	0.000000	0.000961	0.122858	0.000000	0.118448	0	7.592012
	Jabón	16.50	Ton	0.000000	0.000063	0.029872	0.000000	0.080870	0	0.584246
	Sulfato de Sodio	0.00	Ton	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0	0.000000
Maní	Cascarilla	907.20	Ton	0.000000	0.000296	0.224078	0.000000	0.288490	0	2.195424
	Agua de proceso	104.03	Ton	0.000000	0.000002	0.000147	0.000000	0.002455	0	0.008292
	Gomas	16.33	Ton	0.000000	0.000428	0.000949	0.000000	0.002172	0	1.714829
	Fosfato trisodico	1.16	Ton	0.000000	0.000005	0.000783	0.000000	0.006015	0	0.062352
	Glicerina	84.83	Ton	0.000000	0.000380	0.016456	0.000000	0.006226	0	3.825702
	Hidróxido de sodio de proceso	7.84	Ton	0.000000	0.000030	0.014195	0.000000	0.038428	0	0.277624
	Silicato de magnesio de proceso	31.32	Ton	0.000000	0.000955	0.122145	0.000000	0.117760	0	7.547918
	Jabón	16.42	Ton	0.000000	0.000062	0.029726	0.000000	0.080474	0	0.581385

Origen	Residuos	Cantidades Generadas	Unidades	Tipo de Área						
				Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua Marina y Continental	Superficie construida	Tierra Urbanizada	Bosques de CO2
				HE	HE	HE	HE	HE	HE	H.E
	Sulfato de Sodio	0.00	Ton	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0	0.000000
Tempate	Cascarilla	587.02	Ton	0.000000	0.000191	0.144993	0.000000	0.186671	0	1.420580
	Agua de proceso	103.95	Ton	0.000000	0.000002	0.000147	0.000000	0.002453	0	0.008285
	Gomas	16.33	Ton	0.000000	0.000428	0.000949	0.000000	0.002172	0	1.714829
	Fosfato trisodico	1.16	Ton	0.000000	0.000005	0.000783	0.000000	0.006015	0	0.062352
	Glicerina	83.46	Ton	0.000000	0.000374	0.016191	0.000000	0.006126	0	3.763917
	Hidróxido de sodio de proceso	7.84	Ton	0.000000	0.000030	0.014195	0.000000	0.038428	0	0.277624
	Silicato de magnesio de proceso	31.36	Ton	0.000000	0.000956	0.122304	0.000000	0.117913	0	7.557737
	Jabón	16.44	Ton	0.000000	0.000062	0.029751	0.000000	0.080540	0	0.581864
	Sulfato de Sodio	0.00	Ton	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0	0.000000
			Huella ecológica por tipo de tierra	Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua marina y Continental	Superficie Construida	Tierra Urbanizada	Bosques para CO2
			Higuerillo	0.0000	0.0021	0.4025	0.0000	0.5345	0.0000	16.1262
			Maní	0.0000	0.0022	0.4085	0.0000	0.5420	0.0000	16.2135
			Tempate	0.0000	0.0020	0.3293	0.0000	0.4403	0.0000	15.3872

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-22 Hoja de cálculo de HE de residuos para BD sin TEA. PARTE 2

Origen	Residuos	HE total por Tipo de residuo (Hag)
Higuerillo	Cascarilla	2.63
	Agua de proceso	0.0109
	Gomas	1.72
	Fosfato trisodico	0.07
	Glicerina	3.78
	Hidróxido de sodio de proceso	0.33
	Silicato de magnesio de proceso	7.83
	Jabón	0.70
	Sulfato de Sodio	0.00
Maní	Cascarilla	2.71
	Agua de proceso	0.01
	Gomas	1.72
	Fosfato trisodico	0.07
	Glicerina	3.85
	Hidróxido de sodio de proceso	0.33
	Silicato de magnesio de proceso	7.79
	Jabón	0.69
	Sulfato de Sodio	0.00
Tempate	Cascarilla	1.75
	Agua de proceso	0.0109
	Gomas	1.72
	Fosfato trisodico	0.07
	Glicerina	3.79
	Hidróxido de sodio de proceso	0.33

Origen	Residuos	HE total por Tipo de residuo (Hag)
	Silicato de magnesio de proceso	7.80
	Jabón	0.69
	Sulfato de Sodio	0.00
		H.E. Total Producción Biodiesel
	Higuerillo	17.07
	Maní	17.17
	Tempate	16.16

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-23 Hoja de cálculo de HE de residuos para BD con TEA. PARTE 1

Origen	Residuos	Cantida des Generadas	Unidades	Tipo de Área						
				Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua Marina y Continental	Superficie construida	Tierra urbanizada	Bosques de CO ₂
				HE	HE	HE	HE	HE	HE	H.E
Higuerillo	Cascarilla	880.60	Ton	0.000000	0.000287	0.217507	0.000000	0.280030	0.000000	2.131045
	Agua de proceso	110.34	Ton	0.000000	0.000002	0.000156	0.000000	0.002604	0.000000	0.008794
	Gomas	16.33	Ton	0.000000	0.000428	0.000949	0.000000	0.002172	0.000000	1.714829
	Fosfato trisodico	1.16	Ton	0.000000	0.000005	0.000783	0.000000	0.006015	0.000000	0.062352
	Glicerina	79.95	Ton	0.000000	0.000358	0.015509	0.000000	0.005868	0.000000	3.605540
	Hidróxido de sodio de	7.68	Ton	0.000000	0.000000	0.0139	0.000000	0.03764	0.000000	0.2719

Origen	Residuos	Cantida des Generad as	Unidades	Tipo de Area						
				Tierras de Cultivo	Tierras de Pastor eo	Bosqu es	Agua Marina y Continent al	Superfic ie construi da	Tierra urbaniza da	Bosqu es de CO ₂
				HE	HE	HE	HE	HE	HE	H.E
	proceso			00	29	05		4		58
	Silicato de magnesio de proceso	30.86	Ton	0.0000 00	0.0009 41	0.1203 51	0.000000	0.11603 1	0.000000	7.4370 73
	Jabón	0.00	Ton	0.0000 00	0.0000 00	0.0000 00	0.000000	0.00000 0	0.000000	0.0000 00
	Sulfato de Sodio	16.24	Ton	0.0000 00	0.0000 70	0.0109 47	0.000000	0.08413 1	0.000000	0.8721 65
Maní	Cascarilla	907.20	Ton	0.0000 00	0.0002 96	0.2240 78	0.000000	0.28849 0	0.000000	2.1954 24
	Agua de proceso	110.48	Ton	0.0000 00	0.0000 02	0.0001 56	0.000000	0.00260 7	0.000000	0.0088 05
	Gomas	16.33	Ton	0.0000 00	0.0004 28	0.0009 49	0.000000	0.00217 2	0.000000	1.7148 29
	Fosfato trisodico	1.16	Ton	0.0000 00	0.0000 05	0.0007 83	0.000000	0.00601 5	0.000000	0.0623 52
	Glicerina	81.43	Ton	0.0000 00	0.0003 65	0.0157 98	0.000000	0.00597 7	0.000000	3.6726 74
	Hidróxido de sodio de proceso	7.68	Ton	0.0000 00	0.0000 29	0.0139 05	0.000000	0.03764 4	0.000000	0.2719 58
	Silicato de magnesio de proceso	30.68	Ton	0.0000 00	0.0009 36	0.1196 52	0.000000	0.11535 7	0.000000	7.3938 79
	Jabón	0.00	Ton	0.0000 00	0.0000 00	0.0000 00	0.000000	0.00000 0	0.000000	0.0000 00
	Sulfato de Sodio	16.24	Ton	0.0000 00	0.0000 70	0.0109 47	0.000000	0.08413 1	0.000000	0.8721 65
Tempate	Cascarilla	587.02	Ton	0.0000 00	0.0001 91	0.1449 93	0.000000	0.18667 1	0.000000	1.4205 80

Origen	Residuos	Cantida des Generad as	Unidades	Tipo de Área							
				Tierras de Cultivo	Tierras de Pastor eo	Bosqu es	Agua Marina y Continent al	Superfici e construi da	Tierra urbaniza da	Bosqu es de CO ₂	
				HE	HE	HE	HE	HE	HE	H.E	
	Agua de proceso	110.36	Ton	0.0000 00	0.0000 02	0.0001 56	0.000000	0.00260 5	0.000000	0.0087 96	
	Gomas	16.33	Ton	0.0000 00	0.0004 28	0.0009 49	0.000000	0.00217 2	0.000000	1.7148 29	
	Fosfato trisodico	1.16	Ton	0.0000 00	0.0000 05	0.0007 83	0.000000	0.00601 5	0.000000	0.0623 52	
	Glicerina	80.12	Ton	0.0000 00	0.0003 59	0.0155 43	0.000000	0.00588 1	0.000000	3.6133 60	
	Hidróxido de sodio de proceso	7.68	Ton	0.0000 00	0.0000 29	0.0139 05	0.000000	0.03764 4	0.000000	0.2719 58	
	Silicato de magnesio de proceso	30.72	Ton	0.0000 00	0.0009 37	0.1198 08	0.000000	0.11550 7	0.000000	7.4034 97	
	Jabón	0.00	Ton	0.0000 00	0.0000 00	0.0000 00	0.000000	0.00000 0	0.000000	0.0000 00	
	Sulfato de Sodio	16.24	Ton	0.0000 00	0.0000 70	0.0109 47	0.000000	0.08413 1	0.000000	0.8721 65	
				Huella ecológica por tipo de tierra	Tierras de Cultivo	Tierras de Pastore o	Bosque s	Agua marina y Continent al	Superfici e Construi da	Tierra Urbaniza da	Bosque s para CO ₂
				Higuerillo	0.00	0.00	0.38	0.00	0.53	0.00	16.10
				Maní	0.00	0.00	0.39	0.00	0.54	0.00	16.19
				Tempate	0.00	0.00	0.31	0.00	0.44	0.00	15.37

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-24 Hoja de cálculo de HE de residuos para BD con TEA. PARTE 1

Origen	Residuos	HE total por Tipo de residuo (Hag)
Higuerillo	Cascarilla	2.63
	Agua de proceso	0.0116
	Gomas	1.72
	Fosfato trisodico	0.07
	Glicerina	3.63
	Hidróxido de sodio de proceso	0.32
	Silicato de magnesio de proceso	7.67
	Jabón	0.00
	Sulfato de Sodio	0.97
	Maní	Cascarilla
Agua de proceso		0.01
Gomas		1.72
Fosfato trisodico		0.07
Glicerina		3.69
Hidróxido de sodio de proceso		0.32
Silicato de magnesio de proceso		7.63
Jabón		0.00
Sulfato de Sodio		0.97
Tempate		Cascarilla
	Agua de proceso	0.01
	Gomas	1.72
	Fosfato trisodico	0.07
	Glicerina	3.64
	Hidróxido de sodio de proceso	0.32
	Silicato de magnesio de proceso	7.64
	Jabón	0.00
	Sulfato de Sodio	0.97

H.E. Total Producción Biodiesel	
Higuerillo	17.02
Maní	17.12
Tempate	16.12

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-25 Hoja de cálculo de HE de residuos para BE. PARTE 1

Materias Primas e Insumos	Residuos	Cantidades Generadas	Unidades	Tipo de Área						
				Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua Marina y Continental	Superficie construidas	Tierra Urbanizada	Bosques de CO2
				HE	HE	HE	HE	HE	HE	H.E
Residuo	Vinazas	237,216.65	Ton	0.0000	0.0043	0.3345	0.0000	5.5983	0.0000	18.9062
	Flemazas de columna concentradora	19,401.29	Ton	0.0000	0.0004	0.0274	0.0000	0.4579	0.0000	1.5463
	Alcohol im potable	57.74	Ton	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0014	0.0000	0.0046
	Aceites fassel	12.03	Ton	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0000	0.0010
	Flemazas de la rectificación	121,824.23	Ton	0.0000	0.0022	0.1718	0.0000	2.8751	0.0000	9.7094
Emisiones	Dióxido de Carbono	16,353.89	Ton	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4456.1014
				Tierras de Cultivo	Tierras de Pastoreo	Bosques	Agua marina y Continental	Superficie Construida	Tierra Urbanizada	Bosques para CO2
Residuos				0.00	0.01	0.53	0.00	8.93	0.00	30.17
Emisiones				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4456.10

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6-26 Hoja de cálculo de HE de residuos para BE. PARTE 2

Materias Primas e Insumos	Residuos	HE Total por Tipo de residuo (Hag)
Residuo	Vinazas	24.84
	Flemazas de columna concentradora	2.03
	Alcohol impotable	0.01
	Aceites fassel	0.00
	Flemazas de la rectificación	12.76
Emisiones	Dióxido de Carbono	4456.10
		H.E. Total Producción Bioetanol
Residuos		39.64
Emisiones		4,456.10
Total		4,495.74

Fuente: Elaboración propia

HUELLA ECOLÓGICA TOTAL

Tabla A6-27 Hoja de cálculo de HE TOTAL

HUELLA ECOLÓGICA PARA PROCESO PRODUCTIVO DE BODIESEL SIN TEA

Materia prima	Huella Ecológica de Consumos (Hag)	Huella Ecológica de Energía (Hag)	Huella Ecológica de Residuos (Hag)	Huella Ecológica Total (Hag)	Huella ecológica específica Ha globales/ Toneladas de biodiesel producido
Higuerillo	2,194.68	16.26	17.07	2,228.00	2.83
Maní	2,209.02	16.26	17.17	2,242.45	2.86
Tempate	893.08	16.26	16.16	925.50	1.18

HUELLA ECOLÓGICA PARA PROCESO PRODUCTIVO DE BODIESEL CON TEA

Materia prima	Huella Ecológica de Consumos (Hag)	Huella Ecológica de Energía (Hag)	Huella Ecológica de Residuos (Hag)	Huella Ecológica Total (Hag)	Huella ecológica específica Ha globales/ Toneladas de biodiesel producido
Higuerillo	2,210.17	18.97	17.02	2,246.16	2.79
Maní	2,224.53	18.97	17.12	2,260.62	2.82
Tempate	908.59	18.97	16.12	943.67	1.18

HUELLA ECOLÓGICA PARA PROCESO PRODUCTIVO DE BIOETANOL

Materia prima	Huella Ecológica de Consumos (Hag)	Huella Ecológica de Energía (Hag)	Huella Ecológica de Residuos (Hag)
Caña de azúcar	1,984.17	1,329.51	4,495.74

Huella Ecológica Total (Hag)	Huella ecológica específica Ha globales/ Toneladas de bioetanol producido
7,809.42	0.81

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 7

Factores de conversión

- Matriz de energía eléctrica de El Salvador

Tabla A7-1 Matriz de energía eléctrica en El Salvador

Matriz Energética El Salvador		
Recurso	MW	% de participación
Hidráulica	472.6	31%
Geotérmica	204.4	13%
Biomasa	104.5	7%
Térmica	755.1	49%
TOTAL	1536.6	100%

Fuente: CNE (2014).

- Factores de equivalencia para el cálculo de HE.

Tabla A7-2 Factores de equivalencia para cálculo de HE según terreno asociado

Factores de Equivalencia					
Tipo de terreno					
Tierras de Cultivo	Bosques	Tierras de Pastoreo	Agua marina y Continental	Superficie Construida	Tierra Urbanizada
2.51	1.26	0.46	0.37	2.64	2.51

Fuente: Atlas mundial de huella ecológica (2010)

- Factores de absorción de CO₂

Tabla A7-3 Factores de absorción de CO₂ según el tipo de terreno

Factor de absorción (tCO₂/ha)						
Bosques para CO2	Superficie cultivable	Pastos	Bosques	Superficie construida	Mar	Aguas continentales
3.67	1.98	0.84	3.67	1.98	0.24	0.24

Fuente: Domenech (2010).

- Factores de emisión de CO₂

Tabla A7-3 Factores de emisión de CO₂

Factor de emisión (tCO₂/GJ)	
Productos químicos, higiénicos y limpieza; pinturas vegetales, etc.	0.0737
Biomasa	0.1120
Térmica (Fuel y carbón)	0.0973

Fuente: Domenech (2010)

- Asignación de terreno para energía eléctrica

Tabla A7-4 Asocio de terreno para energía eléctrica generada

Asocio de terreno para energía eléctrica generada	
Energía eléctrica generada por:	Tipo de terreno asociado
Combustibles fósiles	Energía fósil
Hidráulicas (altas altitudes)	Pastos
Hidráulicas (bajas altitudes)	Cultivos
Eólica	Pastos
Solar	Cultivos

Fuente: Domenech (2010)

- Factores de conversión de energía eléctrica

Tabla A7-5 Factores de conversión de energía eléctrica a Julios

Energía	Gj	Tipo de energía
1kWh	0.036	Para energía renovable y nuclear
1kWh	0.012	Centrales térmicas, de carbón y combustibles

Fuente: Domenech (2010)

- Productividad de energía

Tabla A7-6 Productividad de energía

Energía renovable	Productividad energética (Gj/ha/año)
Presas ubicadas en altas altitudes	15000.00
Presas de bajas altitudes	640.00
Eólica	60000.00
Biomasa	0.031
Térmica (Carbón y fuel)	0.027
Solar fotovoltaica	1500.00
Geotermia	

Fuente: Domenech (2010)

- Poderes caloríficos de diferentes combustibles

Tabla A7-7 Poderes caloríficos de combustibles

Poder Calorífico Combustibles		
Combustible	Unidades	Poder Calorífico
Gasolina	KJ/Kg	43950
Diesel	KJ/Kg	42275
GLP	KJ/Kg	46350
Biomasa (No madera)	GJ/ton	11.6
Fuel Oil o Bunker	KJ/Kg	39765
Biomasa	KJ/Kg	7.88

Fuente: Domenech (2010)

- Productividad de energía geotérmica

Tabla A7-8 Productiva de energía geotérmica

Tecnología	Tierra en uso m²/MW	Tierra en uso m²/GWh
110 MW Planta geotérmica flash (excluyendo pozos)	1260	160
20 MW Planta geotérmica binaria (excluyendo pozos)	1415	170
49 MW Planta geotérmica FC-RC (excluyendo pozos)	2290	290
56 MW Planta geotérmica flash (incluyendo pozos, tuberías, etc)	7460	900
2258 MW Planta de carbón (incluyendo minería a cielo abierto)	40000	5700
670 MW Planta nuclear (sólo sitio de la planta)	10000	1200
47 MW (promedio) Planta térmica solar (desierto Mojave, CA)	28000	3200
10 MW (promedio) Planta solar fotovoltaica (Sudoeste de Estados Unidos)	66000	7500

Fuente: Anderson (2006)

ANEXO 8

Metodología propuesta para el cálculo de huella ecológica de residuos en El Salvador

El tratamiento que se aplica a los residuos en El Salvador, es a través de rellenos sanitarios del (MIDES, 2014), el cual consiste en las siguientes etapas:

- Compactación de arcilla
- Colocación de geomembrana
- Soldadura de geomembrana
- Sistema de colección y tratamiento de lixiviados
- Colocación de geotextil
- Instalación de capa drenante
- Cobertura final

La presente metodología para evaluar la HE de residuos consiste en emplear la metodología y datos existentes del tratamiento de los mismos en el relleno sanitario (RS) del MIDES, consistiendo en los siguientes pasos:

- Clasificar los residuos provenientes de los procesos productivos y adecuarlos respecto a la clasificación manejada en el RS (Tabla A8-1):

Tabla A8-1 Clasificación de desechos sólidos tratados en relleno sanitario de MIDES

Desechos sólidos	%
Cartón y papel	1.85
Plásticos	1.66
Metales	0.10
Materia orgánica y elementos no recuperables	96.40

Fuente: Manzano (2014).

- Cuantificación de los residuos según la clasificación antes realizada, expresada en unidades de masa.
- Determinar de la energía requerida para el tratamiento de los residuos utilizando los indicadores de tratamiento de residuos, según la siguiente expresión:

Energía para tratar residuo_i=Indicador de tratamiento de residuo_i×Masa_i

La generación de indicadores de energéticos, según proceso de tratamiento de residuos en MIDES comprende:

- Conocer la cantidad de residuos tratados en RS, en toneladas totales de residuos tratados.
- Conocer la energía total consumida en el tratamiento de residuos en el RS.
- Cuantificar la energía requerida para el tratamiento de cada uno de los residuos tratados basados en la clasificación de la Tabla A8-1; empleando la siguiente ecuación:

Energía_{residuo i}=Energía total consumida en R.S×% residuos_i

- Determinar la energía requerida para el tratamiento de cada uno de los residuos por unidad de masa.

Indicador de tratamiento de residuo_i=
$$\frac{\text{Energía requerida para tratamiento}_{\text{residuo } i}}{\text{Toneladas total de residuo} \times \% \text{ residuos}_i}$$

- Multiplicar las toneladas de cada uno de los residuos del proceso con su respectivo indicador energético, para obtener la energía que se requiere para su tratamiento.
- Realizar la sumatoria de la energía total requerida para el tratamiento de los residuos proveniente de cada uno de los procesos productivo:

$$\text{Energía total} = \sum \text{Energía para tratar residuo}_i$$

- Una vez cuantificada la energía requerida para el tratamiento de los residuos se sigue la metodología de huella ecológica para energía.

ANEXO 9

Glosario

A

Ácidos grasos libres

Son ácidos grasos que tienen un grupo ácido pero que no están unidos a un alcohol. Generalmente los ácidos grasos están unidos al glicerol formando triglicéridos y por lo tanto no se encuentran libres., 1

B

Bachada de cal

Es una suspensión que se prepara por el agregado de óxido de calcio más agua el cual neutraliza la acidez natural del guarapo, formando sales insolubles de calcio., 2

Bagazo

Residuo de la caña de azúcar, se emplea como materia prima para la fabricación de papel, combustible, alimento de ganado, 2

Biocombustible

Es un tipo de combustible que consiste de una mezcla de sustancias orgánicas, conformadas a partir de átomos de hidrógeno y de carbono, y que principalmente es utilizado en aquellos motores conocidos como de combustión interna., 1

Biodiesel

Es un biocombustible líquido que se logra a partir de lípidos de origen natural, tal es el caso de los aceites vegetales o de las grasas animales que hayan tenido o no uso previo, sometidos al proceso de transesterificación., 1, 30, 45, 47, 49, 51, 52, 54, 55, 68, 69, 71, 73, 74, 76, 77, 79, 80, 81, 83, 85, 86

Bioetanol

Es un producto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales, tales como cereales, remolacha, caña de azúcar, sorgo o biomasa., 1, 38, 50, 55, 70, 72, 75, 78, 80, 81, 82, 83, 85

C

Cachaza

Primera espuma que suelta el zumo de caña al cocer, 2

Cambio climático

Modificación del clima que ha tenido lugar respecto de su historial a escala regional y global., 1

Capital humano

Remite a la productividad de los trabajadores en función de su formación y experiencia de trabajo., 8, 13, 14

Capital natural

Extensión de la noción económica de capital (medios de producción manufacturados) a bienes y servicios medioambientales., 1, 13, 14

Conservación

Mantenimiento y cuidado de una cosa para que no pierda sus características y propiedades con el paso del tiempo, 1

D

Desarrollo económico

Se puede definir como la capacidad de países o regiones para crear riqueza a fin de promover y mantener la prosperidad o bienestar económico y social de sus habitantes., 1

Desarrollo sostenible

Desarrollo que es capaz de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos y posibilidades de las futuras generaciones., 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 15, 17

E

Ecología

Parte de la biología que estudia las relaciones de los seres vivos entre sí y con el medio en el que viven., 1

Emisiones antropogénicas

Emisiones generadas por el hombre mayoritariamente las de gases de efecto de invernadero., 1

Esterilización

Destrucción de todas las formas de vida microscópicas, incluidos virus y esporas., 2

F

Flóculos

Un grumo de materia orgánica formado por agregación de sólidos en suspensión, 2

G

Gomas

Compuestos complejos de fósforo denominados fosfátidos o más conocidos como fosfolípidos., 1, 47, 48, 53, 54, 55

Gravedad API

Es una medida de densidad que, en comparación con el agua, precisa cuán pesado o liviano es el petróleo., 2

H

Higuerillo

Arbusto, originario de África, de la familia de las euforbiáceas; muy ramificado; tallo hueco y con entrenudos marcados; hojas grandes palmadas; flores macho y hembra en panículas, 1, 47, 48, 67, 68, 69, 70, 74, 75, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85.

I

Índice de productividad

Es el cociente entre la producción de un proceso y el gasto o consumo de dicho proceso, 1

Insostenible

Que no puede ser soportado o tolerado más tiempo., 1

Intrageneracional

Describe un cambio significativo en la posición social dentro de una sola generación., 1, 8

M

Medio ambiente

Es un sistema formado por elementos naturales y artificiales que están interrelacionados y que son modificados por la acción humana. Se trata del entorno que condiciona la forma de vida de la sociedad y que incluye valores naturales, sociales y culturales que existen en un lugar y momento determinado., 1, 6, 7, 8, 11, 12, 15, 17, 23

Melaza

Líquido espeso y dulce, de color parduzco, que queda como residuo de la fabricación del azúcar., 1, 50, 56

Mosto

Residuo de la caña de azúcar., 2

N

Neutralización

Es una reacción química que ocurre entre un ácido y una base produciendo una sal y agua., 2

P

Panoja

Inflorescencia compuesta formada por un racimo cuyos ejes laterales se ramifican de nuevo en forma de racimo o a veces de espiga., 1

Productividad

Es la relación entre la cantidad de productos obtenida por un sistema productivo y los recursos utilizados para obtener dicha producción., 2, 58, 61, 63, 86

R

Recurso

Procedimiento o medio del que se dispone para satisfacer una necesidad, llevar a cabo una tarea o conseguir algo, 1, 59, 71, 72

Residuo

Restos que quedan tras la descomposición o destrucción de una cosa, 1, 52, 65.

S

Saponificar

Convertir en jabón un cuerpo graso, especialmente por la combinación de los ácidos que contiene con un álcali., 2

Sostenibilidad

Cualidad de sostenible, especialmente las características del desarrollo que asegura las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de futuras generaciones., 1, 7, 8, 11

T

Tachos

Aparato de simple efecto, que se usa para procesar la meladura y mieles. Su propósito es producir azúcar cristalizada, mediante la aplicación de calor procedente del vapor de escape de turbinas, 2

Tecnología

Es el conjunto de conocimientos técnicos, científicamente ordenados, que permiten diseñar y crear bienes y servicios que facilitan la adaptación al medio ambiente y satisfacer tanto las necesidades esenciales como los deseos de la humanidad., 1

Tempate

Árbol de hasta 5 m de altura, perenne, de hojas aovadas simples y alternas, que miden de 10 a 25 cm de longitud y 9 a 15 cm de ancho; sus flores miden hasta 25 cm de largo, son de color verdoso o amarillento, y están dispuestas en dicasios terminales o axilares; sus frutos son cápsulas de 3 cm de largo por 2 cm de ancho, de forma elipsoidal, amarillos y dehiscentes en la madurez, 1, 47, 48, 53, 67, 68, 69, 70, 74, 75, 80, 81, 82, 83, 84, 85

Transesterificación

Es el proceso de intercambiar el grupo alcoxi de un alcohol. Estas reacciones son frecuentemente catalizadas mediante la adición de un ácido o una base., 1

V

Vino

Líquido fermentado con levadura., 2